



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Peatges en línia: anàlisi de les seves potencialitats

Autor

Jordi Castells Porta

Tutor

Francesc Robusté - Miquel Estrada

Departament

Infraestructura del transport i del territori

Intensificació

Transport

Data

30 de juny de 2009

Peatges en línia: anàlisi de les seves potencialitats

Autor: Jordi Castells Porta

Directors: Francesc Robusté

Miquel Estrada

Resum

Una de les línies evolutives que segueixen les autopistes des de sempre està enfocada a la millora del nivell de servei ofert a l'usuari. Un peatge, com a element integrat en l'autopista, també ha de renovar-se per tal d'oferir una qualitat als vehicles cada cop més alta. Englobada en aquesta qualitat es troba la capacitat de servei del peatge, és a dir, el nombre de vehicles per unitat de temps que poden ser tractats.

Amb la finalitat d'augmentar aquesta capacitat, s'han realitzat principalment dos tipus d'actuacions: reduir el temps de servei de cada vehicle i incrementar el nombre de carrils del peatge. La primera s'ha pogut dur a terme amb aportacions basades en la tecnologia com els servidors automàtics (que tenen un temps de servei menor que les cabines manuals) o el carril Via-T, el qual permet el tractament d'un vehicle sense necessitat de l'aturada i, per tant, amb un temps de servei pràcticament nul. La segona opció, tot i ser més efectiva quant a augment de capacitat, comporta una ampliació de la plataforma de peatge en la direcció perpendicular al flux dels vehicles. Això implica una sèrie de despeses que ho pot arribar a fer inviable o, fins i tot, impossible en casos en què l'espai que ocupa el peatge es troba condicionat per barreres naturals o artificials com poden ser els rius o els edificis respectivament.

Buscant una solució a aquest conflicte neix la idea del peatge en línia, en sèrie o tàndem. Aquest consisteix en un conjunt de carrils en paral·lel, com els peatges actuals, però cadascun d'ells amb dues cabines o servidors col·locats en línia en la direcció del flux. El primer vehicle que arriba es pot situar al segon servidor que troba en el sentit de circulació deixant el primer lliure per al pròxim vehicle i així, mentre està realitzant el pagament de la taxa, el següent que arriba al carril pot efectuar també la transacció sense haver d'esperar que el primer hagi marxat. Un cop el primer vehicle hagi acabat, pot abandonar el peatge deixant el camí lliure per al segon. En conseqüència, es redueix el temps de servei equivalent per vehicle, augmentant la capacitat del peatge, sense haver d'ampliar l'espai que ocupa en la direcció perpendicular al flux.

És objectiu d'aquest estudi trobar, tant a nivell qualitatiu com a nivell quantitatiu, la viabilitat econòmica d'aquesta solució. Es segueixen dos procediments d'anàlisi: la formulació analítica corresponent i una simulació amb un software creat expressament per la tesina. S'aconsegueix trobar en quines situacions és més adequada la implantació del concepte de peatge en línia i en quines és inviable. Aquest rang de idoneïtat és degut a que l'augment de capacitat del tàndem depèn de les característiques del temps de servei, del temps de reacció i del temps de posicionament; no només influeixen els seus valors mitjos sinó també la seva dispersió o variabilitat. Així es busquen resultats per les cabines de pagament manual, de pagament automàtic i servidors de recollida de tiquet, observant que el millor cas és l'automàtic a causa de la composició dels seus temps.

A més, el concepte de servidor tàndem no és només aplicable a peatges i presenta molt potencial en determinats casos en funció de les característiques del temps de servei associat. Així, amb aquesta tipologia de servei, ideada fa dècades, però que fins ara s'havia menyspreat, s'obre un ampli ventall de possibilitats pels processos de cues.

Peajes en línea: análisis de sus potencialidades

Autor: Jordi Castells Porta

Directores: Francesc Robusté

Miquel Estrada

Resumen

Una de las líneas evolutivas que siguen las autopistas desde siempre está enfocada en la mejora del nivel de servicio ofrecido al usuario. Un peaje, como elemento integrado en la autopista, también debe renovarse para ofrecer una calidad a los vehículos cada vez mayor. Englobada en esta calidad se encuentra la capacidad de servicio del peaje, es decir, el número de vehículos por unidad de tiempo que pueden ser tratados.

Con la finalidad de aumentar esta capacidad, se han llevado a cabo principalmente dos tipos de acciones: reducir el tiempo de servicio de cada vehículo e incrementar el número de carriles del peaje. La primera se ha podido llevar a cabo con aportaciones basadas en la tecnología como los servidores automáticos (que tienen un tiempo de servicio menor que las cabinas manuales) o el carril Via-T, el cual permite el tratamiento de un vehículo sin necesidad de parar y, por lo tanto, con un tiempo de servicio casi nulo. La segunda opción, a pesar de ser más efectiva en cuanto al aumento de capacidad, conlleva una ampliación de la plataforma de peaje en la dirección perpendicular al flujo de vehículos. Esto implica unos gastos que pueden hacer que esta solución sea inviable o incluso imposible en situaciones en las que el espacio ocupado por el peaje se ve condicionado por barreras naturales o artificiales como son los ríos o los edificios respectivamente.

Buscando una solución a este conflicto nace la idea del peaje en línea, en serie o tándem. Éste consiste en un conjunto de carriles en paralelo, como en los peajes actuales, pero todos ellos con dos cabinas o servidores situados en línea en la dirección del flujo. El primer vehículo que llega se puede parar en el segundo servidor que encuentra en el sentido de circulación dejando el primero libre para el próximo vehículo y así, mientras está efectuando el pago, el siguiente en llegar al carril puede realizar también el pago sin tener que esperar a que el primero se haya ido. Una vez el primer vehículo ha acabado, puede abandonar el peaje dejando vía libre para que el segundo pueda hacer lo mismo. En consecuencia, se reduce el tiempo de servicio equivalente por vehículo, aumentando la capacidad del peaje, sin tener que ampliar el espacio que ocupa en dirección perpendicular al flujo.

Es objetivo de este estudio encontrar, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, la viabilidad económica de esta solución. Se realizan dos procedimientos de análisis: la formulación analítica y una simulación con un software creado especialmente para esta tesina. Se consigue encontrar en qué situaciones es más adecuada la implantación del concepto de peaje en línea y en cuales es inviable. Este rango de idoneidad es debido a que el aumento de capacidad del tándem depende de las características del tiempo de servicio, del tiempo de reacción y del tiempo de posicionamiento; no sólo influyen sus valores medios sino que también lo hace su dispersión o variabilidad. Así, se buscan resultados para las cabinas de pago manual, automático y de recogida de ticket, observando que el mejor caso es el automático debido a la composición de sus tiempos.

Además, el concepto de servidor tándem no sólo es aplicable a peajes y presenta mucho potencial en determinados casos en función de las características del tiempo de servicio. Así, con esta tipología de servicio ideada hace décadas, pero que hasta ahora se había menospreciado, se abre un amplio abanico de posibilidades para los procesos de colas.

Tandem toll booths: analysis of their potentialities

Author: Jordi Castells Porta

Directors: Francesc Robusté

Miquel Estrada

Abstract

One of the aims of highways has been always to improve the level of service offered to the user. A toll plaza, as an element included in a toll highway, has also to be renewed so it can offer better quality to the vehicles. In this quality, it is included the service capacity of the toll plaza, in other words, the number of vehicles that can be served per unit of time.

With the purpose of raising this capacity, there have been followed two lines of action: to reduce the service time of each vehicle and to improve the number of lines or toll booths in the toll plaza. The first one has been possible thanks to the progresses in technology. So, now, there are automatic servers, which have a service time more reduced than the manual servers. Another step in this way is the toll booth called Via-T, which doesn't need a stop of the vehicle to pay the tax –it consists in an antenna and a receptor- so, practically, there is no service time. The second option, besides of being more effective increasing the capacity, leads to an extension of the surface of the toll plaza. This extension leads to some expenses which could make the project unfeasible and maybe impossible because of natural and artificial barriers like the rivers and the buildings.

Looking for a solution to this conflict, the idea of the tandem toll booth makes sense. This type of toll plaza consists in a group of toll booths, like usual toll plazas, but each toll booth has two servers in the flow direction. The first vehicle that gets to the toll plaza should use the second server in the flow direction. So he lets free the first server for the next vehicle. The second user who arrives to the plaza can use the other server while the first vehicle is paying its tax. Then two users are served practically at the same time. When first vehicle has finished the service, he leaves the plaza and he lets free way to the second vehicle so he can also follow its way. Consequently, this type of toll plaza reduces the equivalent service time of each vehicle, increasing the capacity of the toll booths without the need of a toll plaza's surface extension.

The aim of this study is to find the economic viability of this solution qualitatively and quantitatively. There have been taken two ways of work: an analytic formulation and a computer simulation with a software created especially for this dissertation. It is found the situations where the tandem service is feasible. This suitability is generated because the capacity increase of the tandem toll booth in front of the usual one depends on the service, reaction and movement time characteristics –not only their mean, also their dispersion. So, there have been exposed results for three kinds of servers: the manual server, the automatic server and the servers to take a ticket. The automatic server has the best results because of its times.

Furthermore, tandem toll booth concept is not only applicable to the toll highways. It has a big potential in some situations depending on the service time associated. So, with the tandem service idea, which has been invented decades ago but has been always underestimated, it is appearing a wide range of options in the queue processes.

Contingut

| | |
|---|-----|
| Llista de Taules | ii |
| Llista de Figures..... | iii |
| Glossari de símbols | iv |
| 1. Introducció i objectius | 1 |
| 1.1. Introducció | 1 |
| Autopistes de peatge..... | 1 |
| Tipologia de peatge segons emplaçament: Oberts i Tancats..... | 1 |
| Elements: Toll booth i Toll plaza..... | 2 |
| Tipus de cobrament | 2 |
| 1.2. Objectius | 3 |
| Passos per millorar la capacitat | 3 |
| L'opció del peatge en línia | 4 |
| 1.3. El peatge en línia..... | 5 |
| Esquema de funcionament del peatge en línia | 5 |
| Anàlisi DAFO del peatge en línia | 6 |
| 2. Metodologia | 12 |
| 2.1. Estat de l'art | 12 |
| Formulació analítica..... | 12 |
| Models de simulació..... | 12 |
| 2.2. Procés de pagament de peatge a nivell micro | 13 |
| 2.3. Formulació teòrica de la capacitat d'un peatge | 19 |
| Cabina habitual..... | 19 |
| Cabines en línia | 21 |
| 2.4. Anàlisi teòric de sensibilitat..... | 26 |
| 3. Eina de simulació | 36 |
| Inputs | 36 |
| Etapas del programa | 38 |
| Outputs | 39 |
| Temps de càlcul..... | 39 |
| Subrutines..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Procés de control | 40 |
| Comprovacions de funcionament..... | 40 |
| 4. Caracterització de les variables | 42 |
| 4.1. Variables relatives a la teoria de cues | 42 |
| Temps de reacció (R) | 42 |
| Temps de posicionament (M, ΔM)..... | 44 |
| Temps de servei o parada (S) | 47 |
| Headway (H) | 52 |
| Taxa d'arribades..... | 57 |
| 4.2. Variables relatives a la composició del trànsit..... | 60 |
| Percentatge de pesants..... | 60 |
| Percentatge d'assignació a cada tipus de cabina | 60 |
| 5. Aplicació a l'AP-7..... | 61 |
| 5.1. Anàlisi de capacitat | 61 |
| Augment de capacitat segons el tipus de cabina | 61 |
| Dimensionament d'un toll plaza amb peatges en línia..... | 65 |
| 5.2. Anàlisi econòmic | 66 |
| 6. Conclusions i recerca futura..... | 73 |
| Conclusions generals..... | 73 |
| Conclusions particulars pel cas de l'AP-7 | 74 |
| Recerca futura | 75 |
| Agraïments | 77 |
| Referències | 77 |
| Annexes | 79 |
| Annex A: Tractament estadístic de les variables..... | 1 |
| Annex B: Anàlisi econòmic..... | 1 |

Llista de Taules

| | |
|--|----|
| Taula 1: Temps de servei segons tipus de cabina de peatge [Font: abertis]. | 47 |
| Taula 2: Percentatge de vehicles lleugers i pesants pel tram de la Roca del Vallès [Font: abertis]...... | 60 |
| Taula 3: Percentatge de demanda de cada tipus de cabina de pagament. | 60 |
| Taula 4: Factor de mal ús en funció de l'etapa d'implantació i de l'escenari..... | 62 |
| Taula 5: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per pagament manual. | 63 |
| Taula 6: Millora de capacitat per pagament manual en funció de l'etapa i l'escenari. | 63 |
| Taula 7: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per pagament automàtic. | 63 |
| Taula 8: Millora de capacitat per pagament automàtic en funció de l'etapa i l'escenari. | 63 |
| Taula 9: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per recollida de tiquet. | 64 |
| Taula 10: Millora de capacitat per recollida de tiquet en funció de l'etapa i l'escenari. | 64 |
| Taula 11: Dimensionament del nombre de cabines de pagament manual i automàtic d'un peatge en funció del flux d'arribada i del factor de mal ús. | 65 |

Llista de Figures

| | |
|--|----|
| Figura 1: Layout esquemàtic d'una plataforma de peatge (simplificació amb un sol sentit de flux). | 2 |
| Figura 2: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 1 de 3). | 5 |
| Figura 3: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 2 de 3). | 6 |
| Figura 4: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 3 de 3). | 6 |
| Figura 5: Anàlisi DAFO del peatge en sèrie. | 7 |
| Figura 6: Mal ús del peatge en sèrie (Pas 1 de 2). Vehicle arribant al servidor tàndem. | 9 |
| Figura 7: Mal ús del peatge en sèrie (Pas 2 de 2). Selecció correcta i incorrecta del vehicle tenint les dues cabines buides. | 10 |
| Figura 8: Bloqueig per avaria en un peatge en sèrie. | 10 |
| Figura 9: Simplificació del procés micro de pagament en un peatge (cabines de pagament manual o automàtic). | 17 |
| Figura 10: Procés micro de pagament en un peatge (cabines de pagament manual o automàtic). | 18 |
| Figura 11: Esquema de les posicions en un peatge habitual. | 19 |
| Figura 12: Diagrama espai vs temps per un peatge amb un sol servidor per carril (amb cua). | 20 |
| Figura 13: Diagrama espai vs temps per un peatge amb un servidor per carril (sense cua). | 21 |
| Figura 14: Layout d'un carril de peatge amb la tipologia en sèrie. | 22 |
| Figura 15: Diagrama espai vs temps per un peatge amb carrils tàndem (cas 1). | 23 |
| Figura 16: Diagrama espai vs temps per un peatge amb carrils tàndem (cas 2). | 24 |
| Figura 17: Corbes de probabilitat acumulada per dues distribucions i el seu producte. | 25 |
| Figura 18: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió. | 30 |
| Figura 19: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió i la seva aproximació. | 31 |
| Figura 20: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió i la seva aproximació (zoom). | 31 |
| Figura 21: Percentatge de millora de capacitat en funció de σ/μ . | 34 |
| Figura 22: Percentatge de millora de capacitat en funció de $E(S)$. | 35 |
| Figura 23: Percentatge de millora de capacitat en funció del factor de mal ús. | 35 |
| Figura 24: Fluxograma de l'eina de simulació. | 38 |
| Figura 25: Histograma del temps de reacció, R. | 43 |
| Figura 26: Densitat de probabilitat del temps de reacció, R. | 43 |
| Figura 27: Histograma del temps de posicionament, M. | 44 |
| Figura 28: Densitat de probabilitat del temps de posicionament, M. | 45 |
| Figura 29: Histograma del temps de posicionament, ΔM . | 46 |
| Figura 30: Densitat de probabilitat del temps de posicionament, ΔM . | 46 |
| Figura 31: Histograma del temps de servei per cabina de pagament manual. | 48 |
| Figura 32: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de pagament manual. | 48 |
| Figura 33: Histograma del temps de servei per cabina de pagament automàtic. | 49 |
| Figura 34: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de pagament automàtic. | 50 |
| Figura 35: Histograma del temps de servei per cabina de recollida de tiquet. | 51 |
| Figura 36: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de recollida de tiquet. | 51 |
| Figura 37: Histograma del headway per cabina de pagament manual. | 52 |
| Figura 38: Diagrama de probabilitat acumulada pel headway i el màxim per cabina manual. | 53 |
| Figura 39: Histograma del headway per cabina de pagament automàtic. | 54 |
| Figura 40: Diagrama de probabilitat acumulada pel headway i el màxim per cabina automàtica. | 55 |
| Figura 41: Histograma del headway per cabina de recollida de tiquet. | 56 |
| Figura 42: Diagrama de probabilitat acumulada pel headway i pel màxim. Cabina recollida tiquet. | 56 |
| Figura 43: Vehicles contats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, un dilluns amb forta demanda [Font: abertis]. | 57 |
| Figura 44: Vehicles contats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, una operació tornada de cap de setmana [Font: abertis]. | 58 |
| Figura 45: Vehicles contats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, una operació tornada de Setmana Santa [Font: abertis]. | 59 |
| Figura 46: Cost de construcció de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils. | 67 |
| Figura 47: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per pagament automàtic. | 68 |
| Figura 48: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per pagament manual. | 69 |
| Figura 49: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per recollida de tiquet. | 70 |

Glossari de símbols

A continuació es mostra un glossari amb els símbols i nomenclatura usada en el desenvolupament de la formulació analítica. Però abans cal tenir clares dues consideracions respecte a la nomenclatura:

- El superíndex prima (') fa referència a paràmetres del peatge en sèrie. Quan aquest no apareix fa referència al peatge habitual d'una sola cabina per carril.
- Els subíndexs numèrics, 1 i 2, fan referència a paràmetres del servidor 1 o del servidor 2 respectivament quan es parla de peatges en sèrie.

C capacitat per carril d'un peatge habitual (amb una sola cabina per carril).

C' capacitat per carril d'un peatge en sèrie (amb dues cabines per carril).

H *headway* per cabina habitual (interval temporal entre dos vehicles servits consecutius).

H' *headway* per cabines en sèrie (interval temporal cada dos vehicles servits).

M temps de posicionament per cabina habitual.

M' temps de posicionament per cabines en sèrie.

ΔM temps extra de posicionament per cabines en sèrie ($M' = M + \Delta M$).

R temps de reacció per cabina habitual.

R' temps de reacció per cabines en sèrie.

S temps de servei, de parada o de pagament per cabina habitual.

S' temps de servei, de parada o de pagament per cabines en sèrie.

φ factor de mal ús (veure apartat 1.3, secció Debilitats).

χ_1 factor 1 (veure apartat 2.4).

χ_2 factor 2 (veure apartat 2.4).

μ esperança matemàtica del *headway*, H, per cabina habitual.

σ desviació estàndard del *headway*, H, per cabina habitual.

$\frac{\sigma}{\mu}$ coeficient de dispersió del *headway*, H, per cabina habitual.

1. Introducció i objectius

1.1. Introducció

Autopistes de peatge

Una autopista de peatge (en anglès *toll road*, *tollway*, *turnpike* o *tollhighway*) és una via en la qual els conductors han de pagar una certa quantitat per poder-ne fer ús. Amb els ingressos que se'n deriven, l'operadora de l'autopista pot finançar les despeses generades durant la construcció de la mateixa (com és el cas de les despeses relacionades a les estructures presents a l'autopista; els ponts, els túnels, etc.) i les relacionades amb la pròpia vida de servei de la via (com poden ser el manteniment, millores de la capacitat i la qualitat de servei, etc). A Espanya s'identifiquen per la nomenclatura AP-XX.

Generalment, en les autopistes de pagament convencional s'abona la taxa en unes estacions de peatge (anomenades, en anglès, *toll plaza*) situades en determinats sectors o trams de la via. Per altre banda es poden trobar autopistes de peatge que no disposen d'aquestes estructures; aquestes s'anomenen autopistes de peatge a l'ombra.

El peatge a l'ombra funciona de la següent manera. Una empresa construeix l'autopista i s'ajorna el pagament per part de l'Administració fent-lo proporcional al trànsit que hi circula, de manera que s'acaba finançant amb els impostos, però s'evita l'endeutament de l'Administració a curt termini. Tot i que l'experiència indica que a llarg termini pot suposar una fallida econòmica.

Un altre tipus de peatge és l'anyal. En aquest els usuaris paguen cada any una quantitat, que s'acredita mitjançant un adhesiu al parabrises, que els permet circular per totes les autopistes lliurement. Els usuaris que tant sols circulen per l'autopista ocasionalment (els turistes, per exemple) han de pagar la mateixa quantitat. Aquest cas va ser aplicat a alguns països com per exemple Suïssa.

Les autopistes que no disposen de cap tipus de peatge estan finançades per l'Administració a través d'altres fonts d'ingressos, com les taxes en el preu de la gasolina o altre tipus d'impostos.

Tipologia de peatge segons emplaçament: Oberts i Tancats

Avui en dia hi ha dos vessants d'estacions de peatges quant al seu emplaçament dins de la via: les troncal i les situades als accessos (d'entrada i de sortida de l'autopista).

En les estacions de peatge troncal (també anomenats peatges oberts), tots els vehicles paren a diversos punts al llarg de l'autopista per pagar la tarifa. Mentre que això permet estalviar diners en la construcció (ja que no hi ha la necessitat d'instal·lar peatges a totes les sortides), pot causar grans congestions de trànsit. A més, pot haver-hi conductors que esquivin el pagament en aquest tipus de peatge, ja que poden sortir de l'autopista abans de l'estació i entrant posteriorment.

Amb el model de peatges als accessos (o peatge tancat), els vehicles recullen un tiquet quan entren a l'autopista que serà determinant a l'hora de pagar en abandonar la via pels peatges de sortida; així s'abona una taxa en funció de la distància recorreguda i, per tant, realment utilitzada de les infraestructures. En cas de pèrdua del tiquet es paga la tarifa equivalent a realitzar un viatge per tota l'autopista corresponent.

Les autopistes de peatge més curtes (que no tenen entrades ni sortides intermitges) poden disposar tant sols d'una estació de peatge al final. Una altre variant és el cas d'autopistes en les quals hi ha un peatge a l'inici i un altre al final (sense accessos intermitjos), així els usuaris paguen a l'entrar i al sortir i no es necessari l'ús de tiquet.

Les autopistes de peatge més modernes solen utilitzar una combinació de les dues vessants amb diverses estacions de peatge a les entrades i sortides i, addicionalment, alguna estació troncal.

Elements: Toll booth i Toll plaza

Les estacions de peatge o *toll plaza* estan compostes per una sèrie de carrils en paral·lel, anomenats *toll booth* (Schaufler, 1997), en els quals es situa cadascun dels vehicles per efectuar el pagament (Figura 1). Aquest pagament, des dels anys inicials de les autopistes de peatges fins avui en dia, s'ha pogut realitzar de diverses formes i segueix en constant evolució per tal de poder millorar la capacitat de la via on es troba el peatge i, en conseqüència, la qualitat del servei ofert als usuaris.

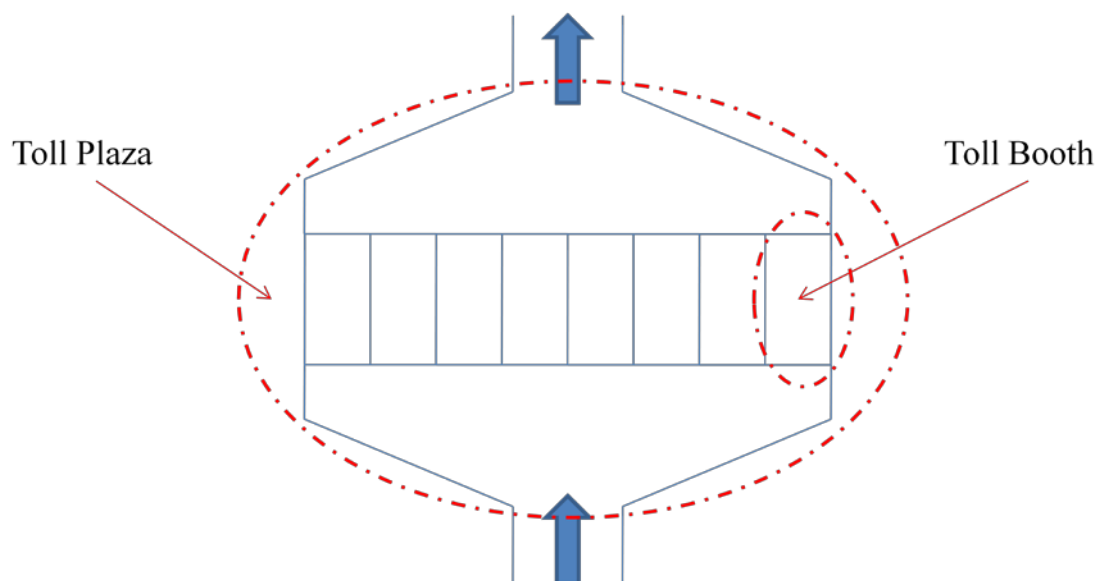


Figura 1: Layout esquemàtic d'una plataforma de peatge (simplificació amb un sol sentit de flux).

Tipus de cobrament

Actualment, hi ha tres tipus de cobrament als peatges de les autopistes espanyoles. Aquests són els següents:

- **Manual:** atès per un treballador. Permet el pagament amb targeta de crèdit i en efectiu. Requereix la parada del vehicle.
- **Automàtic:** atès per un servidor automàtic. Pagament exclusiu amb targetes. Requereix la parada del vehicle.
- **VIA-T (telepeatge o TAG) :** procés automàtic. No hi ha transacció física en el pagament. Per tant, no requereix la parada del vehicle, simplement una

disminució adequada de la velocitat. Consisteix en una antena que detecta un dispositiu situat a l'interior del vehicle que passa pel carril.

D'altra banda hi ha països que usen altres tipus de peatges de forma complementaria o substitutiva als anteriors. Per exemple, als Estats Units existeix un mètode similar al VIA-T anomenat *E-Zpass*, el qual està molt estès. Aquest, igual que el VIA-T, no requereix la parada del vehicle, però sí una sensible disminució de la velocitat. Però hi ha altres casos en els que no és necessària ni tant sols aquesta disminució de velocitat. Per exemple, a Ontario, Canadà, l'autopista *407 Express Toll Route* (ETR) disposa d'uns aparells d'escaneig làser en certs punts de control que prenen la matrícula de tots els vehicles que circulen per aquells punts de l'autopista. Posteriorment es realitza el cobrament als comptes bancaris corresponents. O el cas d'Alemanya, on s'està instaurant el sistema de peatges a través de GPS. Com s'observa, les solucions tendeixen a necessitar el mínim de temps possible per a la transacció, per tal d'evitar demores en la circulació.

1.2. Objectius

Passos per millorar la capacitat

L'objectiu de les vies de transport és permetre una comunicació entre diferents nodes de la xarxa que conforma l'activitat de la població. Les autopistes, tenen la característica de permetre un desplaçament més directe i còmode entre els diferents nodes, que les carreteres convencionals. Els seus objectius complementaris són la comoditat, la seguretat i l'eficàcia. Dins de la eficàcia es troba la necessitat d'oferir capacitat per al flux de vehicles cada cop més gran. La capacitat màxima d'una autopista és d'uns 2400 vehicles per hora i carril (considerant una velocitat de flux lliure ideal de 120 km/h). Però aquesta velocitat de flux lliure, i per tant la seva capacitat associada, es redueixen per culpa de factors físics com l'ample de carril, la distància a obstacles laterals, el nombre de carrils i la densitat d'enllaços.

Els factors esmentats anteriorment afecten a la capacitat d'una autopista considerant una circulació constant, sense interrupcions en el trànsit. Si hi ha algun tipus d'interrupció en la circulació dels vehicles, es produeix, òbviament, una reducció de la capacitat. Un peatge, és una d'aquestes interferències en la circulació fluida d'una autopista. Els vehicles entren en un servidor (el peatge) per efectuar el pagament de les taxes corresponents i això comporta una parada d'un cert temps (temps de servei). A partir d'aquest temps de servei es pot obtenir el nombre màxim de vehicles per hora que poden travessar el peatge (la capacitat és l'invers del temps de servei). Per tant, per molt bones condicions que tingui la via en el tram troncal, si existeix un peatge, aquest influirà en la capacitat global de l'autopista.

Així doncs es veu clara la necessitat d'augmentar el nombre de vehicles per hora que poden ser tractats en un peatge, és a dir, la seva capacitat de servei. Aquesta capacitat ve determinada per dues variables: el nombre de servidors i el temps de servei que requereix cada vehicle.

Augmentar el nombre servidors, avui en dia, equival a augmentar el nombre de carrils. Això és una solució òbvia que comporta unes despeses en la adaptació del terreny corresponent i la construcció de la infraestructura (eixamplar la platja de peatges). A més, hi ha situacions en les que és totalment inviable augmentar el nombre de carrils degut a barreres naturals o altres infraestructures adjacents que limiten l'espai disponible per a la plataforma de peatge.

En quant al temps de servei, hi ha hagut una evolució al llarg dels anys per tal de reduir-lo. Inicialment es realitzava el cobrament de monedes en operadors manuals (personal empleat). Posteriorment es va adoptar la cabina de cobrament automàtic amb efectiu, fins a meitat dels 90, i més tard amb targetes reduint sensiblement el temps de servei. L'última implementació a les autopistes espanyoles és el VIA-T, mètode pel qual un vehicle efectua el pagament sense haver d'aturar el vehicle ja que no hi ha transacció física de monedes ni targetes. Amb això s'elimina la idea que el patge comporta una interrupció en la circulació dels vehicles de l'autopista; tant sols comporta una reducció de la velocitat, permetent capacitats de servei més elevades.

L'opció del peatge en línia

L'alternativa a aquestes solucions que s'estudia en aquesta tesina és la implementació del peatge en línia (peatge en sèrie o tàndem). Aquesta disposició consisteix en la col·locació de dues cabines, ja siguin automàtiques o manuals, de cobrament en cada carril. El funcionament consisteix en que el primer vehicle que arriba es col·loca al servidor del fons (servidor 1: el segon que es troba en entrar al carril) si aquest està buit, i a continuació, el pròxim vehicle que arribi pot situar-se al servidor més proper a l'entrada o servidor 2 (veure procés en detall a l'apartat 1.3). Amb això s'aconsegueix el tractament gairebé simultani de dos vehicles per carril, amb la qual cosa es redueix el temps de servei equivalent a dos vehicles, sense la necessitat d'augmentar la plataforma de peatge en amplada. De totes maneres, per instal·lar el peatge tàndem, seria necessària una adaptació de la infraestructura, com l'allargament del carril i de la coberta, la instal·lació d'una segona cabina, la re-programació de la barrera, l'adaptació dels sensors, etc. Tot això comporta una sèrie de despeses que s'han de tenir en compte (veure apartat 5.2).

Aquesta idea tant sols és vàlida per a vehicles lleugers, ja que per a vehicles pesants, el carril en sèrie hauria de ser excessivament llarg, cosa que no és viable. D'altra banda tampoc és lògic pensar en un peatge en línia per a servidors tipus VIA-T, així que l'anàlisi del peatge en sèrie es durà a terme tant sols per cabines manuals (pagament amb targeta o efectiu) i automàtiques (pagament amb targeta de crèdit).

L'objectiu d'aquesta tesina és analitzar la millora de capacitat, de la cua màxima, del temps de trajecte i d'altres paràmetres del trànsit per a aquest sistema de peatges en línia. Això es realitzarà tant de forma teòrica amb expressions analítiques com a través d'una simulació amb un programa informàtic creat especialment per la tesina i es contrastaran els resultats obtinguts. A més es realitzarà un anàlisi de viabilitat econòmica de la implantació d'aquests tipus de peatge tant des del punt de vista de l'operador com de la societat. Les despeses són les associades a la construcció, manteniment i operació d'aquest nou sistema. Quant a l'operador es tindrà en compte l'estalvi en l'expropiació de terrenys i en la construcció de les instal·lacions, ja que pel fet d'augmentar capacitat en línia, es reduirà l'ample ocupat pel *toll plaza*. El benefici social que se'n deriva prové de la reducció del temps d'espera en les cues i, per tant, del temps de trajecte, augmentant la capacitat, així com el nivell de servei global ofert a l'usuari de l'autopista.

1.3. El peatge en línia

Esquema de funcionament del peatge en línia

A continuació es mostra l'esquema de funcionament ideal del peatge en sèrie (més endavant es veurà que pot haver-hi comportaments per part de l'usuari que provoquin bloquejos en el sistema). S'ha esquematitzat en tres passos:

- En el primer pas (Figura 2), es consideren buits els dos servidors del mateix carril de peatge tàndem. Aleshores arriba un vehicle (vehicle 1).
- En el segon pas (Figura 3), el vehicle 1 es situa a la cabina de peatge del fons (servidor 1) deixant lliure per ser utilitzat el servidor 2. Arriba el vehicle 2.
- En el tercer i últim pas (Figura 4), el vehicle 2 s'atura al servidor 2 i, per tant, en aquest moment, si el vehicle 1 encara no ha abandonat el peatge s'està produint un tractament gairebé simultani de dos vehicles en un sol carril de peatge.

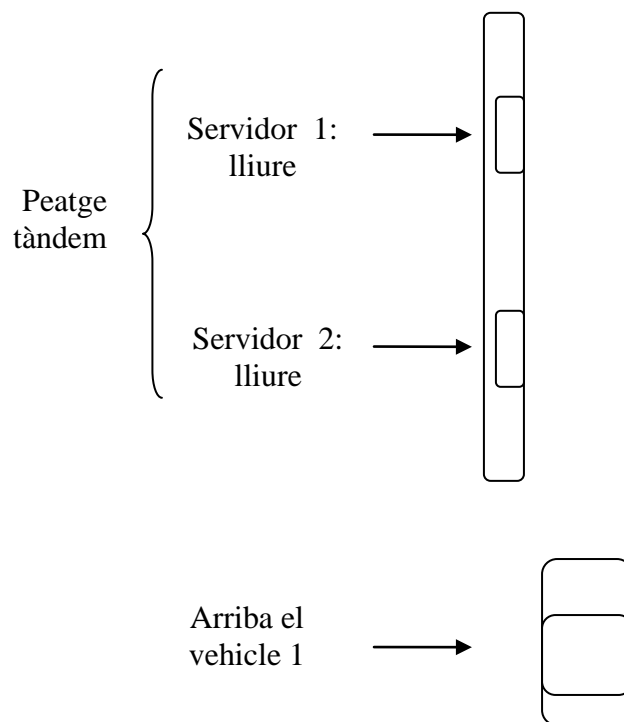


Figura 2: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 1 de 3).

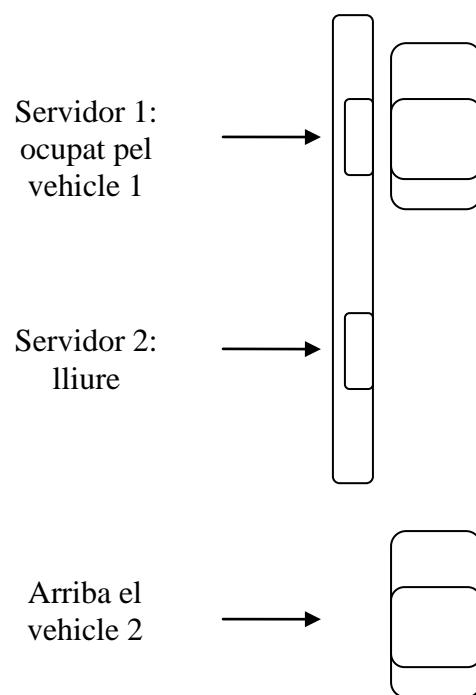


Figura 3: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 2 de 3).

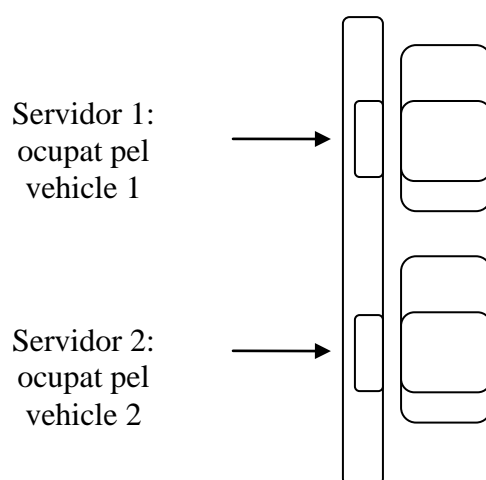


Figura 4: Esquema de funcionament del peatge en sèrie (pas 3 de 3).

Anàlisi DAFO del peatge en línia

L'anàlisi DAFO (o SWOT en literatura anglesa) consisteix en un anàlisi dels punts a favor i en contra d'una solució analitzant tant els factors externs com els interns a la pròpia solució.

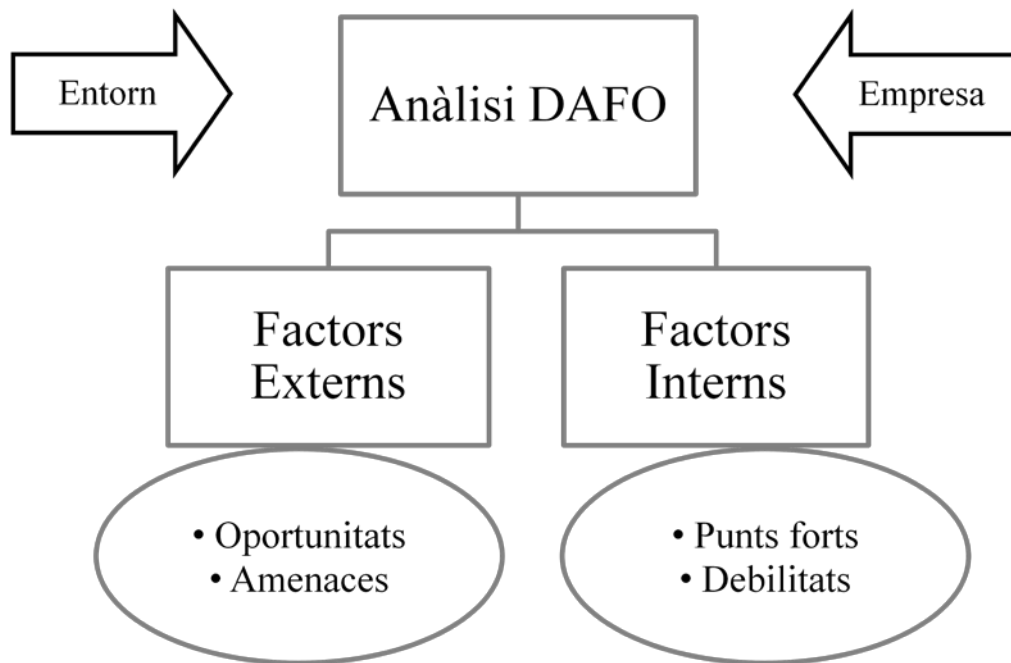


Figura 5: Anàlisi DAFO del peatge en sèrie.

Factors Externs

Els factors vinculats amb l'entorn que afecten al peatge en sèrie es poden agrupar en oportunitats (positius) i amenaces (negatius).

Oportunitats

Dins de les oportunitats que afavoreixen la idoneïtat del peatge en sèrie des del punt de vista extern tenim les següents:

- **Tendència en el flux de trànsit.** Aquesta va augmentant any rere any (amb excepció de les etapes de crisi on el flux de vehicles pot disminuir), per tant és necessària la millora de les autopistes i tots els seus elements (entre ells els peatges) per tal d'augmentar-ne la capacitat de vehicles que poden suportar. El peatge en sèrie ofereix un augment d'aquesta capacitat evitant fer platges de peatge excessivament amples.
- **Patrons socials i estil de vida.** Actualment es valora molt el temps de les persones i, per tant, és necessari reduir tot temps d'espera improductiu (entre els quals es troba qualsevol tipus de cua).
- **Necessitat de servidors manuals i/o automàtics.** La tendència actual és augmentar el nombre de carrils VIA-T dels peatges, ja que aquests són els més eficaços quant a capacitat. Però en els propers anys, tot i aquesta evolució, serà imprescindible mantenir una proporció de cabines manuals i/o automàtiques, ja que serà gairebé impossible aconseguir que tots els usuaris espanyols tinguin el dispositiu VIA-T. Però a més, els vehicles estrangers que utilitzin les autopistes espanyoles, no disposaran d'aquest dispositiu. Una solució ideal seria aconseguir la unificació a nivell internacional d'un dispositiu similar al VIA-T. Però en aquests anys de traspàs, és necessari mantenir cabines manuals i/o automàtiques, així que el peatge en sèrie ofereix la possibilitat de mantenir aquests tipus de

cabines però destinant-hi un menor nombre de carrils, ja que cada paquet tàndem té més capacitat que una sola cabina habitual.

Amenaces

Quant a les amenaces, és a dir, els factors externs que influeixen de manera negativa en l'adopció del sistema de peatges en línia, trobem les següents:

- **Evolució tecnològica.** Com ja s'ha comentat als apartats 1.1 i 1.2 la tendència dels països és adoptar solucions de caire més tecnològic que no pas el peatge en línia, com poden ser les càmeres fotogràfiques, el GPS, etc.
- **Acceptació per part dels usuaris.** La idea del peatge en línia és totalment nova per als usuaris (conductors) de les autopistes, per tant, la introducció d'aquest sistema comportaria un esforç per part seva per entendre'l i fer-ne un ús correcte, ja que si no s'usa de forma correcta, el peatge tàndem seria totalment inservible. Per aconseguir aquest bon ús i acceptació, serà necessari un procés de difusió i pedagogia previ a la posada en funcionament i una senyalització adequada in situ.
- **Marc econòmic.** A la data d'aquest estudi, el context econòmic mundial és de crisi, per tant tot projecte que requereixi una inversió ha d'oferir un resultat molt rendible per tal que sigui acceptat.

Factors Interns

Els factors intrínsecs (i.e. característics del peatge en sèrie) és poden agrupar en punts forts (positius) i debilitats (negatius).

Punts forts

El peatge en línia ofereix una sèrie de propietats que fan adequada la seva implantació:

- **Augment de la capacitat.** És clar, degut al funcionament del peatge tàndem, que aquest ofereix la possibilitat de tractar dos vehicles simultàniament a cada carril, per tant la capacitat del conjunt serà major que una cabina habitual. És objectiu d'aquesta tesina determinar l'augment de capacitat corresponent.
- **Reducció de l'ample de la plataforma de peatge.** Com ja s'ha comentat, el *toll plaza* està compost per una sèrie de carrils (*toll booth*) cadascun amb una cabina de cobrament. Si s'adopta el peatge en línia, degut a l'augment de capacitat que s'obtindrà a cada carril, es podrà reduir el nombre de carrils necessaris per a un mateix flux d'arribada. Amb això s'aconsegueix una reducció del cost de construcció de la plataforma. A més, hi ha situacions en les que no es pot augmentar l'ample del *toll plaza* per certes raons vinculades amb l'orografia (barreres naturals o artificials) i es requereix un augment de la capacitat del peatge. En aquest cas, la idea de peatge en sèrie guanya molta força.
- **Reducció de costos.** Com ja s'ha comentat, el peatge en sèrie ofereix la possibilitat d'acceptar un mateix flux d'arribada amb un menor nombre de carrils que els peatges habituals. Però a canvi comporta una inversió en la construcció dels carrils en sèrie. Això requereix un estudi de viabilitat econòmica (apartat 5.2).
- **Disminució de la contaminació.** Si s'imagina un peatge habitual amb el servidor ocupat i una cua formada al seu darrera, es pot veure que cada vegada que el vehicle del servidor hagi acabat el procés de pagament i abandoni el peatge, la cua avançarà una sola posició. Això implica que es produirà un cicle d'arrencada i desplaçament de tots els vehicles de la cua per cada vehicle que

surti del sistema. En canvi, si s'imagina un peatge en sèrie, també amb els servidors ocupats i una cua formada al darrera, la cua es mourà quan els dos vehicles dels servidors tàndem hagin abandonat el sistema, i ho farà avançant dues posicions a la vegada. Així que es produirà un cicle d'arrencada per a tots els vehicles una vegada cada dos vehicles que surtin del sistema reduint així el nombre d'arrencades a la meitat. Si es té en compte que en les arrencades és el moment en que el cotxe té major consum i, per tant, emet més gasos contaminants a l'atmosfera, queda demostrada la contribució del peatge en sèrie a la conservació del medi ambient tant a nivell d'estalvi de recursos (consum de combustible) com a nivell de contaminació (emissió de gasos).

Debilitats

Els factors intrínsecs negatius del peatge en línia són els següent:

- **Canvi en l'hàbit de l'usuari.** Aquest sistema comporta la necessitat d'una entesa d'un nou procediment per part dels usuaris. Aquest canvi d'hàbit en els usuaris no es podrà aconseguir d'un dia per l'altre i comportarà, segurament, una sèrie de reclamacions.
- **Bloqueig per mal ús.** Un dels principals problemes que té el peatge en tàndem és el bloqueig per mal ús, això consisteix en que hi haurà vehicles que, per desconeixement del funcionament o per falta d'atenció, aturaran el vehicle en el primer servidor (servidor 2) tot i tenir el servidor del fons (servidor 1), que els correspon, lliure. Amb això estan bloquejant l'accés al servidor 1 per part d'altres usuaris i, per tant, impeding el servei simultani de dos vehicles, amb la qual cosa es cancel·la la idea de peatge en sèrie passant a funcionar com un peatge habitual amb una sola cabina (veure Figura 6 i Figura 7).

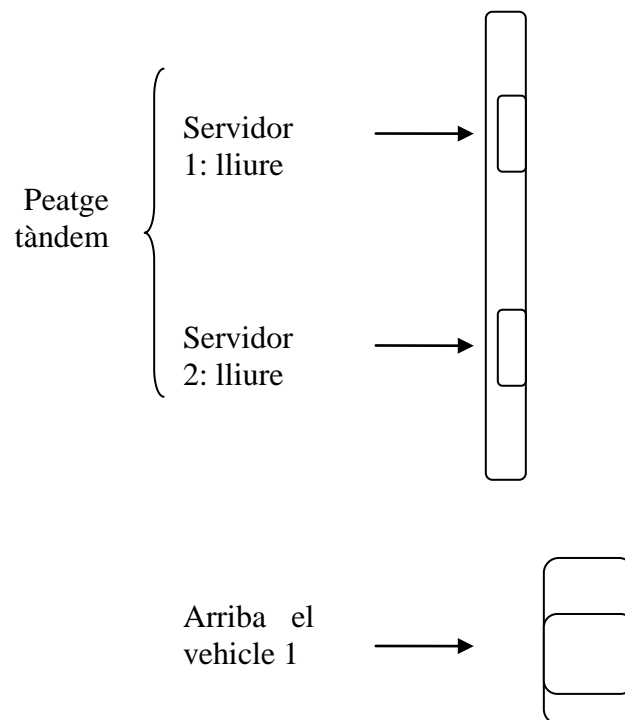


Figura 6: Mal ús del peatge en sèrie (Pas 1 de 2). Vehicle arribant al servidor tàndem.

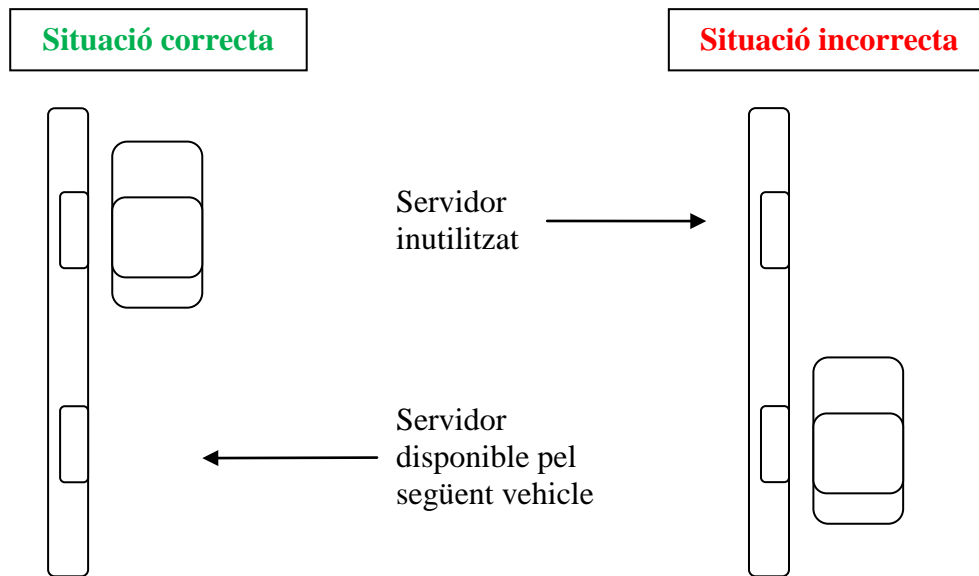


Figura 7: Mal ús del peatge en sèrie (Pas 2 de 2). Selecció correcta i incorrecta del vehicle tenint les dues cabines buides.

- **Bloqueig per avaria.** Si un vehicle pateix una avaria quan està situat a una cabina de peatge habitual, els vehicles que estan al seu darrera esperant han de fer maniobres per canviar de carril amb el perill que això comporta. En el cas tàndem, hi ha aquest mateix problema, però a més pot existir el cas que el vehicle del servidor 1 pateixi una avaria o algun problema relacionat amb la transacció (tarja que cau, caducada, etc) i el del servidor 2 hagi efectuat el pagament de la taxa. Això comporta una pèrdua de temps important pel segon vehicle.

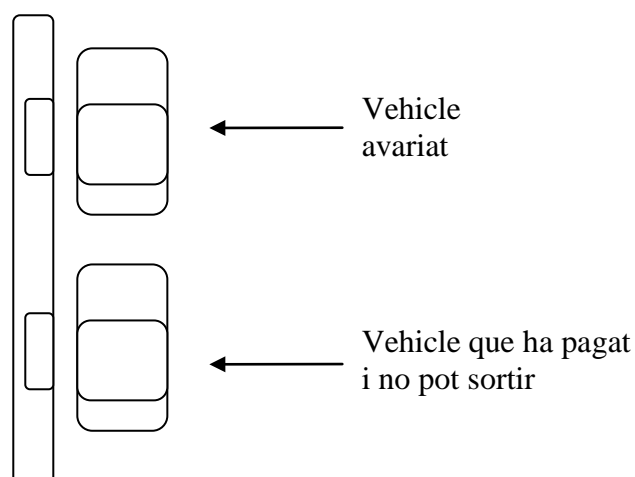


Figura 8: Bloqueig per avaria en un peatge en sèrie.

- **Funcionament lògic de la barrera.** En el peatge en línia la barrera s'haurà d'automatitzar segons uns criteris diferents als habituals, així que caldrà reprogramar-la, amb els costos que això comporta. Una altre opció és suprimir la barrera. Aquest mètode és usat en altres peatges, com per exemple el peatge del Golden Gate Bridge a San Francisco. Enlloc de barrera, hi ha una càmera fotogràfica que pren la imatge dels vehicles que creuin sense efectuar el pagament de la taxa corresponent, cosa que és detectada gràcies a uns sensors disposats al *toll booth*. Tot i això, a Espanya, degut a la legislació i a les costums i hàbits dels usuaris, no és recomanable suprimir la barrera.

2. Metodologia

2.1. Estat de l'art

Abans d'entrar en el procediment que s'ha seguit per aquest estudi és necessari tenir una idea del que s'ha fet fins ara al respecte. Hi ha hagut avenços en temes relacionats en teoria de cues, tant a nivell analític, obtenint múltiples expressions, (per a capacitat, longitud de cua, temps de demora...) com a nivell de software, que permet realitzar situacions de cues amb diversos fluxos d'arribades i nivell de servei.

Formulació analítica

Teoria de cues

Un peatge és un sistema de cues format per un servidor (cabina) i una cua d'espera. Existeix una gran quantitat de formulacions vinculades a la teoria de cues per trobar la cua màxima, demora mitja, capacitat de servei... Però la majoria d'elles dedicades a un sol servidor o múltiples, però en paral·lel (Hillier & Lieberman, 2002). S'han establert formulacions analítiques per diferents distribucions de probabilitat en els temps entre arribades (ja sigui exponencial, normal, uniforme, Erlang...) i en els temps de servei (també pot ser exponencial, normal, uniforme, Erlang...).

Tandem toll booths

En relació al peatge en línia no es troba gaire documentació. El text més important al respecte és (Daganzo & Hall, 1982). On s'analitza la formulació teòrica corresponent al peatge tàndem obtenint una expressió que determina l'augment de capacitat en relació a un *toll booth* habitual. A l'apartat 2.3 d'aquesta tesina es tracta en detall aquesta teoria. L'estudi també inclou uns resultats numèrics equivalents a un augment de capacitat del peatge tàndem del 15% respecte del peatge habitual. Aquestes conclusions, les quals han servit de referència les últimes dues dècades, són coherents amb els temps de servei que es van considerar per l'estudi, però si es prenen els temps que corresponen als peatges de les autopistes espanyoles, s'obtenen uns resultats molt més encoratjadors, els quals són tractats en detall a l'apartat 5, Aplicació a l'AP-7.

Models de simulació

Quant a models informàtics que permetin simular un procés de cues equivalent al peatge es poden englobar en dos grans blocs. Així trobem programes informàtics comercials vinculats al món industrial com el Witness i l'Arena i programes específicament lligats al món dels transports, com l'Aimsun. Aquest últim incorpora molta més precisió referent a l'anàlisi micro dels sistemes de transport.

A continuació es tracten els pros i contres que ofereix cadascun d'aquests grups amb més detall.

Models industrials de simulació (Witness, Arena)

Existeix un gran nombre de programes informàtics comercials de simulació de sistemes de cues vinculats a la indústria amb diverses aplicacions, ja sigui per a fàbriques amb línies transfer, sistemes de recollida d'equipatge en un aeroport, cadenes de muntatge de vehicles, etc. Dos d'ells són el Witness i l'Arena. No s'ha usat cap d'aquests programes informàtics ja que no reproduïen el fenomen del trànsit, és a dir, ignoren aspectes com el temps de reacció, el canvi de carril, la inestabilitat del trànsit, el tipus de vehicle i usuari, l'aspecte físic i *layout* del *toll plaza*, efectes de la proximitat d'obstacles, etc.

Tot i això, tenen l'avantatge de poder simular, tant fluxos d'arribada com temps de servei, de forma estocàstica, vinculant aquetes variables aleatòries a unes distribucions de probabilitat adequades.

Models de simulació de trànsit (Aimsun)

En el camp del transport, existeixen diversos programes de simulació, entre ells, un de molt important és l'Aimsun. Aquest programa té l'avantatge de reproduir els fenòmens del trànsit, cosa que no permeten els programes Witness i Arena. Però com a inconvenients presenta la mancança de reproduir variables estocàstiques (tant en flux d'arribada com en temps de servei) a part de les distribucions exponencials i normals. A més, no permet simular el funcionament intrínsec d'un peatge en sèrie, havent de programar uns *scripts* específics en el propi Aimsun per poder dur a terme una simulació correcta.

De totes maneres, en aquesta tesina, s'ha fet servir aquest programa per tenir una aproximació inicial a la idea del peatge en línia. També ha servit per l'obtenció d'algunes dades vinculades al trànsit, com els temps de moviments de vehicles, temps de reacció, etc. A la vegada que ha servit per la comprovació d'alguns resultats obtinguts amb un altre programa informàtic de simulació, el qual ha estat elaborat expressament per aquesta tesina (a l'apartat 3, Eina de simulació, es desenvolupa tot el referent a aquest software).

2.2. Procés de pagament de peatge a nivell micro

El procés de servei (pagament) en un peatge consta d'una sèrie de subprocessos consecutius vinculats a l'anàlisi micro del trànsit, els quals afecten, cadascun amb diferent grau de rellevància, en el temps necessari per cada vehicle per ser servit. Això afecta directament al valor de la capacitat del peatge, ja que la capacitat ve determinada per l'invers d'aquest temps.

Aquest procés es mostra a la Figura 10 i a continuació es descriuen amb detall cadascun dels seus subprocessos (l'ordre correspon al d'aparició en el sentit de la circulació dels vehicles):

Weaving/Trenat inicial

Un peatge està format per més carrils que els del tronc de l'autopista que hi desemboca. El seu nombre exacte depèn del flux d'arribada i de la capacitat que pugui oferir cada carril. És per això que és necessari un espai físic en el qual es produeixi la transició dels N carrils del tram d'autopista als P carrils del peatge (amb $P > N$). Aquesta transició ha de ser gradual per suavitzar els moviments dels vehicles, evitant així incidents i permetent un fàcil omplert de totes les cabines del peatge, ja que sinó les cabines dels extrems (dreta i esquerra) difícilment serien ocupades pels vehicles. Però com més suau es pretengui fer aquest trenat, més espai ocuparà la plataforma del peatge aigües amunt i aigües avall del flux i, per tant, més s'encarirà la obra.

En aquest espai de transició els vehicles redueixen la velocitat sensiblement i efectuen les maniobres necessàries (només les justes) per tal de preparar la incorporació a algun dels carrils del peatge.

Empaquetat de cues

Els vehicles que arriben a un peatge tenen diversos carrils per escollir on efectuar el pagament. Aquesta selecció del carril o *toll booth* al qual es volen incorporar es basa no només en el tipus de cabina de pagament que pretenen utilitzar (ja sigui manual, automàtica o ViaT), sinó també en les possibles cues existents en aquell instant en cadascun dels carrils.

Habitualment hi ha més d'una cabina per cada tipus de cobrament o cabines mixtes que admeten més d'un tipus de cobrament. Així que un cop feta la selecció del tipus de cabina, s'ha d'escollir entre les cabines d'aquell tipus. En aquest punt els vehicles es poden realitzar diferents processos lògics. Es té en compte si hi ha carrils amb cues i carrils sense, escollint habitualment el carril sense cua. Si tots en tenen, es pot escollir la cua més curta i que, aparentment, sembla la que menys temps perdut comporta (tot i que no té perquè ser així). Una altra opció és anar a la cua que requereixi menys maniobres (la més propera). La selecció final dependrà, entre d'altres, del tipus d'usuari, del dia de la setmana i de la franja horària.

Aquesta selecció influeix directament en l'empaquetat de les cues. Aquest empaquetat seria òptim si cada vehicle escollís el carril tal que, en el conjunt de tots els vehicles, els temps perduts fossin mínims. Això consisteix en un algorisme d'assignació de recursos òptim relacionat amb el *bin packing problem*. L'altre extrem seria el cas en el que els vehicles seleccionen el carril de forma aleatòria, aquí es produirien unes cues asimètriques, la qual cosa comportaria un mal resultat quant a la capacitat global del peatge. En conclusió, els vehicles no saben quant temps comportarà realment cadascun dels carrils (no sempre el carril amb menys cua és el més ràpid), així que la assignació real mai serà la òptima. El resultat serà un empaquetat intermig.

Cua

La cua és on els usuaris esperen a ser atesos. No sempre hi haurà cua, habitualment els vehicles poden accedir directament a alguna cabina de peatge sense haver d'esperar prèviament. En el cas que hi hagi cua, aquesta comporta la principal pèrdua de temps existent i, per tant, de qualitat de servei si tenim en compte el valor del temps. És per això que s'intenta reduir al màxim la cua, i inclús eliminar-la, a través de diverses tècniques, totes enfocades a augmentar la capacitat de servei del peatge.

A mida que els vehicles de les posicions de servei surten del sistema, els vehicles de la cua corresponent van avançant posicions formant-se el típic efecte acordió a causa dels temps de reacció i acceleració.

Temps de reacció

El temps de reacció és l'instant que transcorre entre l'arrencada de dos vehicles consecutius a la cua. Està motivat principalment per la falta d'atenció dels vehicles a la cua, ja que no poden estar permanentment pendents del vehicle del davant (això s'accentua més en casos de cues molt llargues i de temps de servei de cada vehicle grans). A més, el temps de reacció té una component senso-biològica personal i depèn de molts paràmetres, alguns vinculats al conductor del vehicle, entre els quals trobem l'edat, l'experiència i l'estat d'ànim i d'altres externs a l'usuari, com són la franja horària i el dia de la setmana. No tenen el mateix comportament els vehicles que fan el

mateix recorregut cada dia a la mateixa hora per desplaçar-se a la feina (*commuters*) que els que realitzen desplaçaments d'oci de cap de setmana. Per això, el temps de reacció no es pot considerar una variable determinista, sinó vinculada a una distribució de probabilitat. Els valors més habituals que es poden obtenir de diverses literatures es situen entre 1,5 i 2 segons. Però es poden trobar valors inferiors a un segon i majors a dos segons en funció dels esmentats paràmetres.

Acceleració

Subprocés en el què els vehicles passen de la parada (a la cua) a la velocitat d'avanç (la qual és molt reduïda en el cas dels peatges). En els diagrames de trajectòries espai-temps s'acostuma a negligir, però influeix en el temps total de posicionament del vehicle. A més, aquesta part del procés és molt important a nivell mediambiental ja que és en la que hi ha major consum de combustible per part dels vehicles i una major emissió de gasos contaminants a l'atmosfera. A més, aquesta etapa, com es pot veure a la Figura 10, es repetirà sempre que encara hi hagi vehicles per davant a la cua. Així que, per reduir tant aquest consum com les emissions corresponents, s'hauria de reduir el nombre de vegades que un vehicle arranca al llarg d'una cua abans de sortir-ne (nombre de cicles que es repeteix aquesta etapa). Això es pot aconseguir en el cas de peatges en línia reduint a la meitat el nombre d'arrencades (veure apartat 1.3, Punts forts).

El temps equivalent a aquesta etapa depèn principalment del tipus d'usuari o conductor, del tipus de vehicle (pesant, lleuger o moto) i de la climatologia, ja que si l'asfalt està mullat els vehicles acceleren amb més cura.

Trajecte

Etapa en la qual el vehicle ocupa la posició del vehicle que tenia al davant i, per tant, avança posicions en el sistema. El temps equivalent a aquesta etapa depèn dels mateixos factors que l'acceleració.

Desacceleració i frenat

Subprocés que s'efectua per a aturar el vehicle a la posició que correspongui, ja sigui la posició de servei al costat de la cabina o una posició més endavant dins de la mateixa cua. El temps que comporta la desacceleració i frenada també dependrà dels mateixos factors que l'acceleració.

Preparatiu pel pagament

Un cop el vehicle ha arribat a la posició de servei corresponent i està aturat al costat de la cabina (ja sigui manual o automàtica) ha de preparar-se per al pagament de la taxa, és a dir, ha de buscar la targeta de crèdit o l'efectiu. El temps que comporta aquesta etapa és molt variable ja que pot ser casi inexistent en alguns casos que els vehicles van preparats (habitualment els *commuters*) o pot allargar-se excessivament en casos com els usuaris que no troben la targeta o l'efectiu i, per exemple, pot ser que hagin d'anar a buscar-ho al maleter del vehicle. Aquest valor depèn doncs del tipus de conductor, del dia de la setmana junt amb la franja horària i del motiu del viatge.

Pagament

El pagament correspon a la operació d'introduir la targeta i recollir-la (en el cas del servidor automàtic) o d'entregar l'efectiu o targeta a l'operador manual de les cabines i esperar-ne el canvi o devolució (en el cas de cabines de pagament manual). En els casos que es vulgui obtenir un rebut, això allargarà el temps de pagament.

El temps que comporta aquesta operació no té gairebé variabilitat en el cas de cabina automàtica, essent en la cabina manual on hi ha més factors que poden provocar desviacions en el temps, ja que intervenen dues persones.

Temps de reacció

Semblant al temps de reacció anterior amb la diferència que en aquest cas no està provocat per falta d'atenció, sinó per l'agilitat del propi conductor que acaba de realitzar el pagament i ha de guardar la tarja, el canvi o el rebut.

Acceleració

Etape similar a l'anterior acceleració però amb la diferència que aquí s'ha d'agafar una velocitat elevada, ja que posteriorment s'ha d'incorporar a l'autopista. Aquesta és realitzada una sola vegada per cada vehicle, a diferència de l'anterior subprocés d'acceleració que es repeteix en casos de cua cada vegada que un vehicle abandona el peatge.

Trajecte

Etape en la qual el vehicle es desplaça sortint del carril del peatge en direcció al tronc principal de l'autopista. Aquí s'adquireix la velocitat adequada a la via. Aquesta etapa no té influència en la capacitat del sistema de peatge ja que el vehicle ja ha estat servit i els que hi ha al seu darrere estan aturats, per tant el vehicle servit no afecta als que encara estan al sistema (tant a la cua com a les cabines).

Merging/Trenat final.

Els vehicles servits en cada *toll booth* han d'accedir al tronc de l'autopista. Com s'ha comentat en el *weaving* o trenat inicial, el nombre de carrils del peatge és superior al nombre de carrils de l'autopista, per tant, els vehicles ara han de convergir a un ample menor, amb la qual cosa han de tenir cura de les maniobres dels vehicles propers per tal que no hi hagi incident. Això provoca certes reaccions d'accelerades, frenades i desplaçaments laterals amb la qual cosa, en certs casos, es poden arribar a provocar petits embussos en l'espai que ocupa aquest trenat anterior al tronc de l'autopista (passat el peatge). En aquest sentit, l'augment de capacitat de servei del peatge pot arribar a ser contraproductiu, ja que hi haurà més vehicles servits per unitat de temps que hauran de convergir en els mateixos carrils d'autopista. Per evitar problemes en aquest *merging* es poden prendre una sèrie de mesures, com per exemple al Estats Units, a on es disposen un seguit de semàfors que donen verd de dos segons als diferents vehicles usant una seqüència a portell.

Conclusions i simplificacions

Cada vehicle repetirà el cicle format pel temps de reacció, acceleració, trajecte i desacceleració i frenada mentre hi hagi vehicles a la cua per davant seu. Cadascuna de les vegades que es repeteix aquest cicle, tots els vehicles de la cua avancen una posició, consumint combustible en l'arrencada i emetent gasos contaminants a l'atmosfera. En el cas del peatge en sèrie, considerant que s'ha format cua, el nombre de vegades que es repeteix el cicle es divideix entre dos amb les implicacions favorables per al medi ambient que això comporta.

A l'hora d'estudiar la millora de capacitat entre un peatge habitual (una sola cabina per carril) i el peatge en sèrie (dues cabines per carril), es tindran en compte les següents simplificacions del procés per tal de tractar els trets diferencials i, per tant, els únics que realment afecten a la comparativa.

Els subprocessos anteriors a la cua i posteriors al pagament no es diferencien entre la formulació del peatge habitual i la del sistema en sèrie. Així que només es té en compte a nivell teòric i qualitatiu.

El conjunt de subprocessos constituït per acceleració, trajecte i desacceleració i frenada, es considerarà, per l'estudi analític i la simulació informàtica, com una única etapa, anomenada etapa de posicionament, ja que poden ser agrupats en un sol terme gràcies a la seva naturalesa.

El període que comprèn el temps de preparatius per al pagament i el pagament de la taxa es considera com un temps global de parada o temps de servei pròpiament dit (S). Aquesta simplificació és fa per poder prendre les dades de camp i per l'estudi analític i la simulació.

D'aquests subprocessos simplificats se n'obtingran dades de camp i se'n farà l'estudi estadístic per aconseguir les distribucions probabilístiques que millor s'hi ajusten.

Així doncs, simplificant el procés, s'obté l'esquema següent (Figura 9) el qual serà el que es tindrà en compte en l'estudi analític de capacitat. En els casos en què no hi hagi cua, el temps de reacció desapareix i el temps de posicionament es redueix ja que no hi haurà acceleració des de la posició de parada, simplement una lleugera adequació de la velocitat fins a parar a la posició al costat de la cabina o servidor escollit.

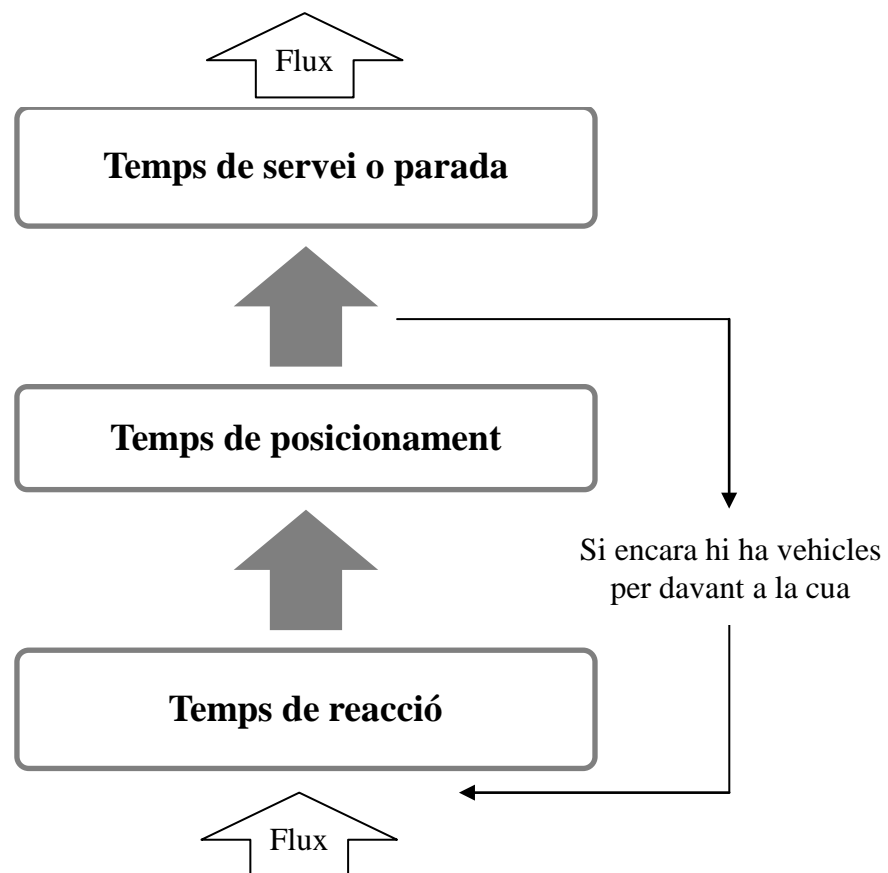


Figura 9: Simplificació del procés micro de pagament en un peatge (cabines de pagament manual o automàtic).

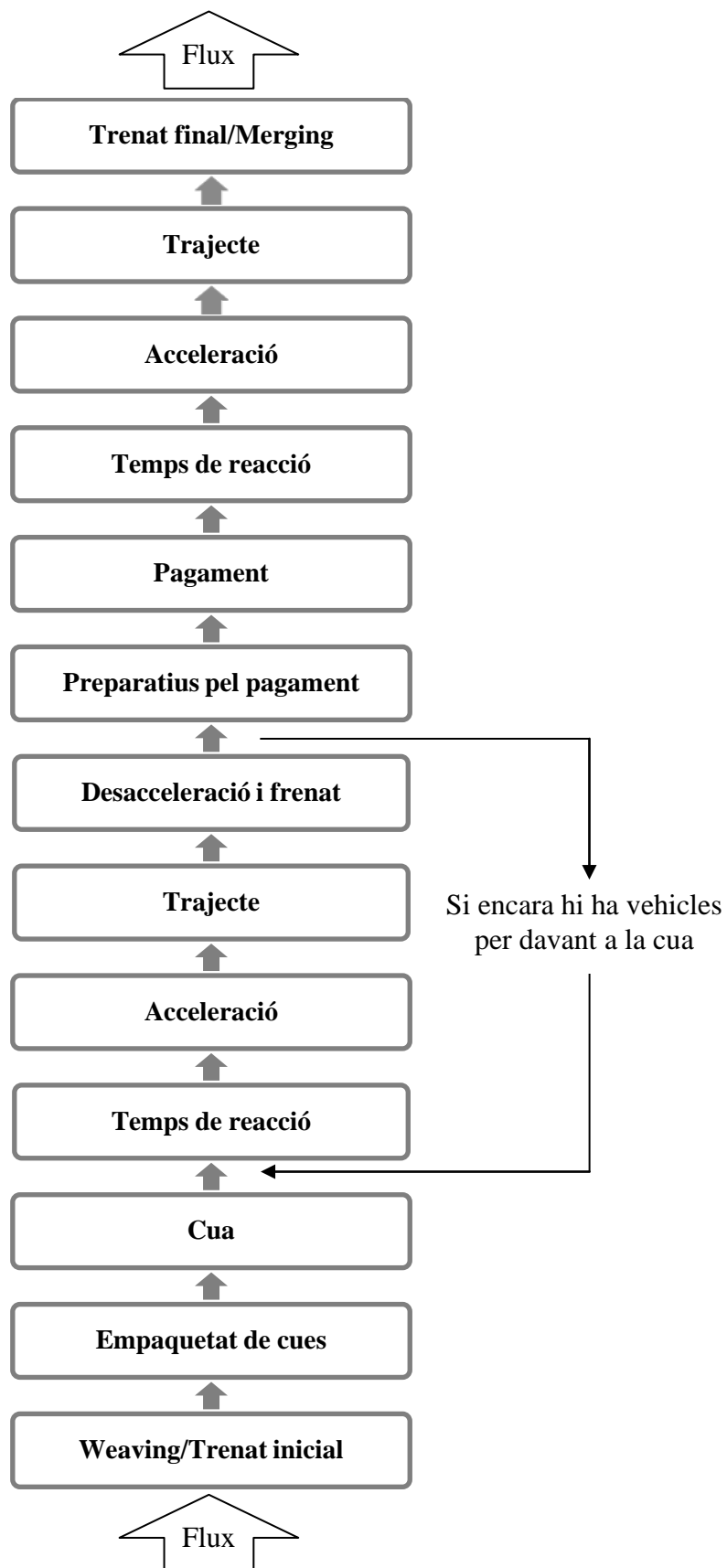


Figura 10: Procés micro de pagament en un peatge (cabines de pagament manual o automàtic).

2.3. Formulació teòrica de la capacitat d'un peatge

En aquest apartat es desenvolupa la formulació elaborada per (Daganzo & Hall, 1982) corresponent al peatge habitual i al tàndem arribant a extreure'n l'expressió analítica de la capacitat de servei i , per tant, la millora d'aquesta d'un cas respecte l'altre. Posteriorment, a l'apartat 2.4 es desenvolupen expressions més enllà de la teoria establerta per (Daganzo & Hall, 1982). Al Glossari de Símbols (pàgina iv) s'especifica l'abreviació i nomenclatura de cada variable usada.

Cabina habitual

Abans de desenvolupar la teoria d'un peatge en sèrie, i amb la finalitat de comprendre millor les seves expressions, es considera l'operativa d'un peatge habitual. S'anomena posició de servei a la posició que ocupa un vehicle quan està efectuant el pagament de la taxa i posició d'espera a la posició del vehicle que està just darrera de la posició de servei. Així es numeren els vehicles de la següent forma: al vehicle que està a la posició de servei se'l numera amb un 0, i als següents vehicles amb 1, 2, 3...

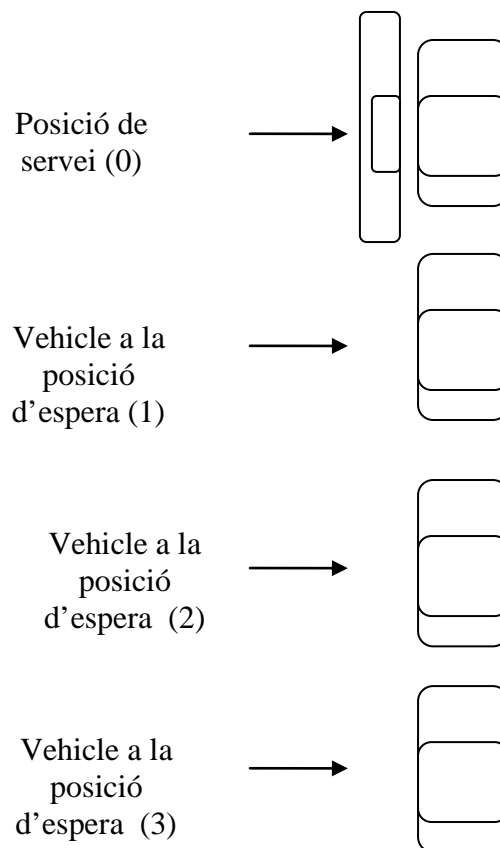


Figura 11: Esquema de les posicions en un peatge habitual.

A l'instant en que el vehicle 0 abandona la posició de servei, el vehicle 1 es disposa a canviar de la posició d'espera a la de servei, per posteriorment continuar la seva marxa. Així hi haurà un interval temporal (*headway*, H) entre el vehicle 0 i 1 que està compost de tres components: el temps de reacció, de posicionament i de parada.

$$H = R + M + S \quad [1]$$

- El **temps de reacció** (R) equival a l'interval des que el vehicle 0 abandona la posició de servei fins que el vehicle 1 inicia el moviment. Aquest temps serà pràcticament nul per franges horàries en que els conductors siguin habituals (els *commuters*), és a dir, hores puntes al matí i al vespre dels dies laborables.
- El **temps de posicionament** (M) correspon al temps necessari per al vehicle 1 per tal de canviar la seva posició des de la d'espera fins la de servei.
- El **temps de parada** (S) o **de servei** és aquell que necessita el vehicle 1 per efectuar el pagament, ja sigui amb monedes o targeta, fins que arrenca un altre cop per continuar la marxa darrera el vehicle 0.

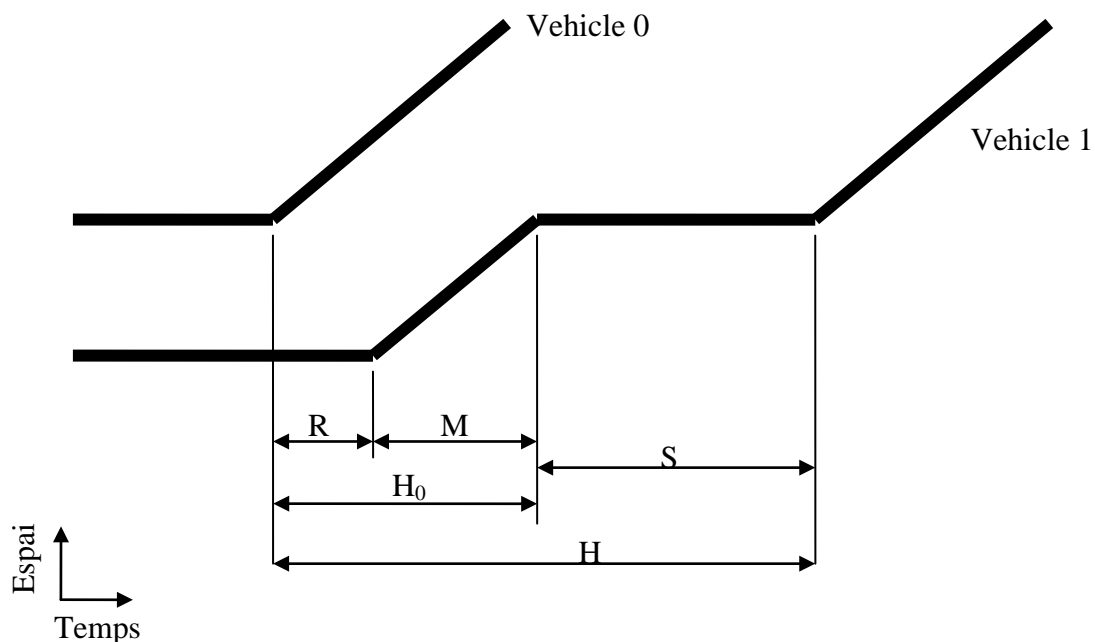


Figura 12: Diagrama espai vs temps per un peatge amb un sol servidor per carril (amb cua).

Però hi ha alguns vehicles que no han de parar a la posició d'espera ja que quan estan arribant el vehicle 0 marxa i, aleshores, tant sols redueixen la velocitat per incorporar-se a la posició de servei. Així doncs, aquests vehicles no tenen temps de reacció. Però aquest cas no es tindrà en compte en l'estudi, ja que les expressions que s'extreuen del peatge en sèrie i, per tant, la comparativa, corresponen a situacions de cua permanent que, com es veurà més endavant, és quan aquest sistema de peatge dóna el seu màxim potencial.

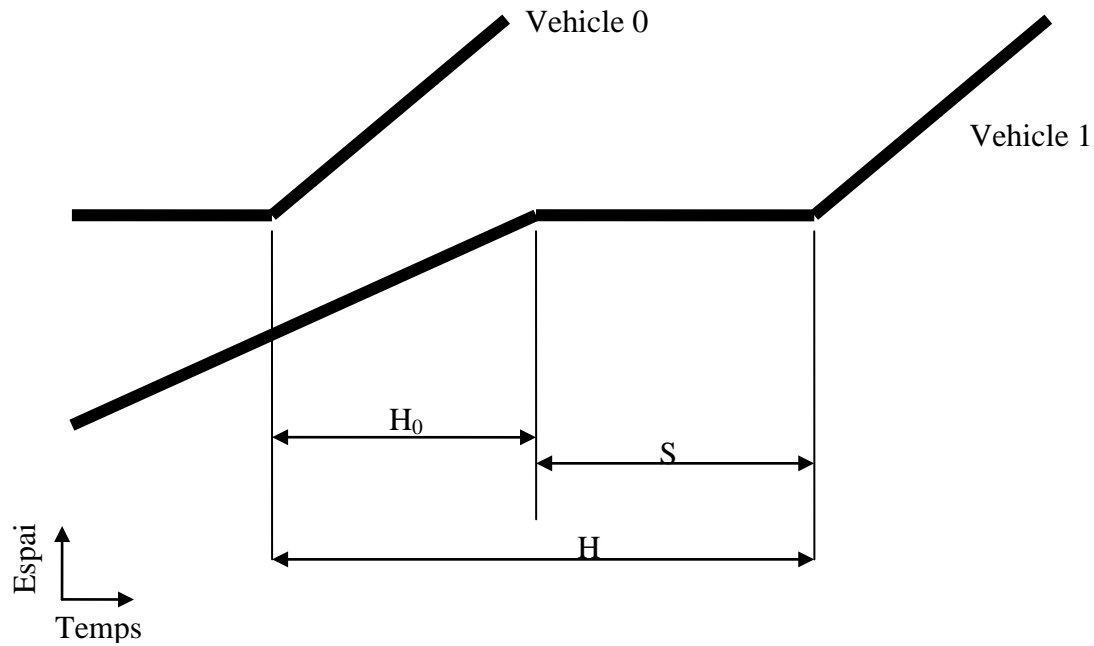


Figura 13: Diagrama espai vs temps per un peatge amb un servidor per carril (sense cua).

Cal tenir en compte que el temps de reacció (R), el temps de posicionament (M) i el temps de parada (S) són variables aleatòries que depenen del vehicle, del conductor, del dia de la setmana, de la franja horària, etc. Aleshores podem treballar amb l'esperança matemàtica d'aquests valors per obtenir l'esperança de l'interval temporal entre vehicles (H).

$$E(H) = E(R) + E(M) + E(S) \quad [2]$$

A partir d'aquest valor es pot determinar el valor de la capacitat (C) del peatge amb la següent expressió:

$$C = \frac{1}{E(H)} \quad [3]$$

Cabines en línia

Aquesta disposició de les cabines de peatge consisteix en la col·locació de dues cabines en un mateix carril, en línia, en sèrie o en tàndem (termes equivalents) sense cap posició d'espera intermitja. En la figura adjunta es pot veure el *layout* d'un *toll booth* format per aquestes cabines. S'anomenarà servidor 1 (a l'últim servidor que es troba un vehicle en arribar al peatge en el sentit del flux) i servidor 2 (al primer que es troba).

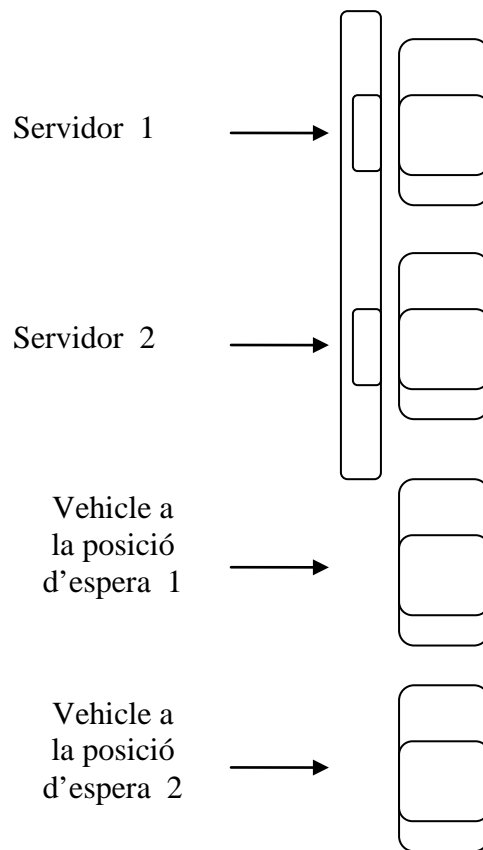


Figura 14: Layout d'un carril de peatge amb la tipologia en sèrie.

La mecànica consisteix en el següent: quan un vehicle arribi, suposant que les dues cabines estiguin buides, es col·locarà a la cabina del fons del carril (servidor 1), on podrà realitzar el servei corresponent. Suposant que aleshores arribi un altre vehicle i decideixi incorporar-se al mateix carril, aquest podrà parar-se al costat de la segona cabina (servidor 2), amb la qual cosa podrà efectuar el pagament de la seva taxa sense haver d'esperar a que el vehicle del seu davant hagi acabat. Un cop el primer vehicle hagi acabat el seu temps de servei, podrà abandonar el carril i, al seu darrere, el segon vehicle (veure l'esquema del funcionament a l'apartat 1.3).

Ara considerem que el vehicle 0 és atès a la posició 2. I els vehicles que esperen al seu darrere s'anomenen 1, 2... El temps que passa entre que el vehicle 0 abandona la seva posició de servei fins que el vehicle 1 completa i abandona la posició de servei (T_1') ocupant el servidor 1 ve donat per l'expressió:

$$T_1' = R_1' + M_1' + S_1' \quad [4]$$

R_1' temps de reacció per al vehicle 1 en un servidor en línia

M_1' temps de posicionament per al vehicle 1 en un servidor en línia

S_1' temps de parada o de servei per al vehicle 1 en un servidor en línia

El vehicle 2 no pot accedir a la seva posició de servei (posició de servei 2) fins que el vehicle 1 no hagi arrencat, per tant, el temps des que el vehicle 0 arranca i abandona el

peatge fins que el vehicle 2 ha completat el seu servei (no fins que abandona el peatge)
és:

$$T_2' = R_1' + (R_2' + M_2' + S_2') \quad [5]$$

Però el vehicle 2 no pot abandonar el peatge fins que el vehicle 1 ha abandonat la seva posició, ja que el servidor 1 està per davant del servidor 2 en el mateix carril. Així que l'interval de temps (H') des que el vehicle 0 abandona el peatge fins que el vehicle 2 fa el mateix és el màxim de les dues combinacions següents:

Cas 1: és el cas en el que el vehicle 1 abandona el peatge abans que el vehicle 2 hagi completat el seu temps de servei. Aleshores el *headway* H' s'obté gràficament i analíticament com es mostra a continuació (Figura 15):

$$H' = R_1' + (R_2' + M_2' + S_2') \quad [6]$$

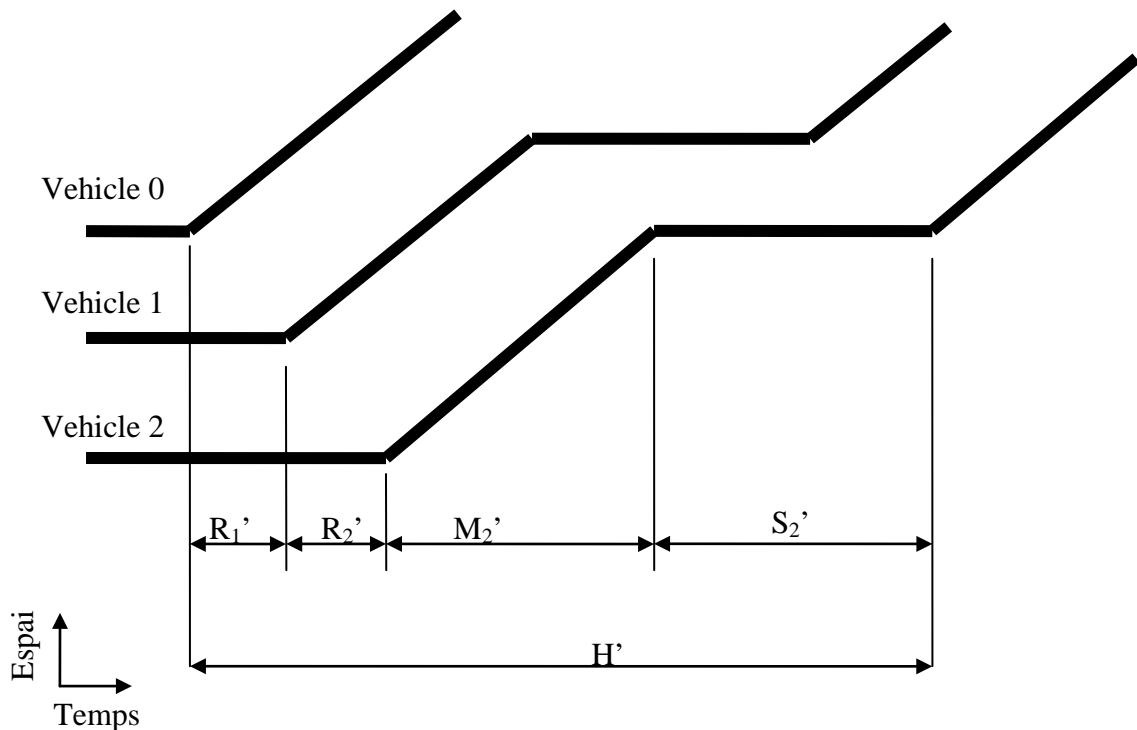


Figura 15: Diagrama espai vs temps per un peatge amb carrils tàndem (cas 1).

Cas 2: és el cas en el que el vehicle 2 completa el seu temps de servei abans que el vehicle 1 abandoni el servidor 1 i, per tant, el vehicle 2 haurà d'esperar. L'expressió i el gràfic es mostren a continuació:

$$H' = (R_1' + M_1' + S_1') + R_2' \quad [7]$$

Tenint en compte aquestes relacions, es pot treure un R i ΔM fora del màxim ja que són iguals i així podem obtenir la següent expressió simplificada:

$$\begin{aligned} H' &= \max \{R_1' + (R_2' + M_2' + S_2'); (R_1' + M_1' + S_1') + R_2'\} \\ &\cong R + \Delta M + \max\{R_2 + M_2 + S_2; R_1 + M_1 + S_1\} \\ &= R + \Delta M + \max \{H_2, H_1\} \end{aligned} \quad [10]$$

On H_1 i H_2 són els intervals temporals entre vehicles observats al cas de cabina habitual. No s'ha d'oblidar que aquestes variables són aleatòries i tenen associades unes distribucions de probabilitat. Per obtenir la capacitat d'un carril de cabines en línia (C') i tenint en compte les propietats de linealitat de l'esperança matemàtica es dedueix la següent expressió (el numerador de valor dos prové del fet que dos vehicles són servits en cada interval H'):

$$C' = \frac{2}{E(H')} = \frac{2}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max\{H_2, H_1\})} \quad [11]$$

Per a determinar el valor de $\max\{H_2, H_1\}$ es considera que la probabilitat que el màxim de H_1 i de H_2 sigui menor que un valor, és el mateix que la probabilitat que H_1 i H_2 siguin menors que aquest valor. Per tant, la distribució de probabilitat acumulada per la variable $\max\{H_2, H_1\}$ és el producte de les distribucions de probabilitat de H_1 i de H_2 (veure Figura 17). I el valor de l'esperança matemàtica d'aquesta variable, $\max\{H_2, H_1\}$, és l'àrea compresa a sobre de la corba de probabilitat acumulada entre el temps igual a zero i infinit (això és cert per variables positives, com n'és el cas).

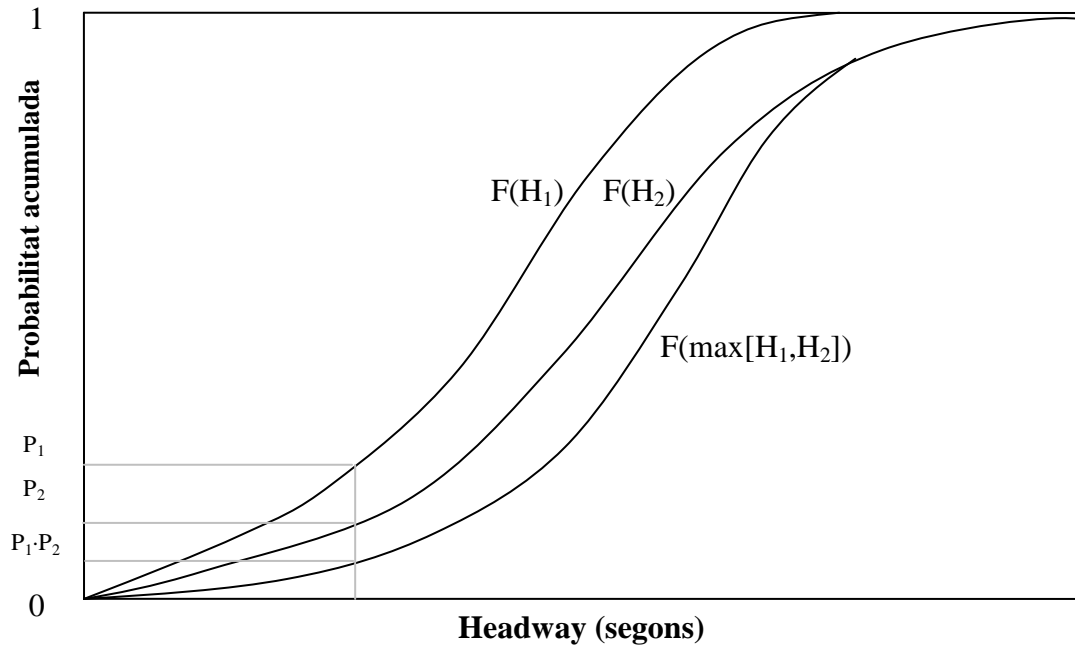


Figura 17: Corbes de probabilitat acumulada per dues distribucions i el seu producte.

L'augment de capacitat màxim (considerant 0% de mal ús) en percentatge del servidor en sèrie respecte l'habitual, $\Delta C(\%)$, s'obindrà de la següent expressió:

$$\Delta C(\%) = 100 \cdot \left(\frac{C'}{C} - 1 \right) = 100 \cdot \left(\frac{2 \cdot E(H)}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max\{H_2, H_1\})} - 1 \right) \quad [12]$$

C: capacitat per carril del peatge habitual.

C': capacitat per carril del peatge en sèrie.

H: *headway* de la cabina habitual.

R: temps de servei.

ΔM : temps extra de posicionament necessari en les cabines en sèrie.

Observant aquesta expressió es desprèn que l'únic factor a favor de l'augment de capacitat és el fet que dos vehicles són atesos. Però també s'aprecia que el temps de reacció (R) i el temps de moviment extra ΔM afecten negativament a l'augment de capacitat, sobretot en els casos que aquests temps siguin importants en relació a l'interval temporal H. La variable $\max\{H_2, H_1\}$ serà més gran com més aleatorietat tinguin les variables H_1 i H_2 , i això també afecta de forma negativa a l'augment de capacitat d'un servidor tàndem. Tots aquests factors donen la ràpida idea que l'augment de capacitat d'un servidor en línia serà sempre menor al doble de la capacitat d'un servidor habitual.

Per tant, s'arriba a la conclusió que l'augment de capacitat del peatge en sèrie en front el peatge habitual depèn dels temps que es tinguin en el peatge d'estudi, i per determinar-ne la millora amb certa precisió és necessari treballar amb uns valors de les variables el més propers a la realitat possible. Tenint en compte que, com ja s'ha dit anteriorment, totes aquestes variables temporals estan associades a unes distribucions de probabilitat, es fa imprescindible treballar en profunditat amb un programa d'anàlisi estadístic (s'usarà el MINITAB 14) i trobar les distribucions de probabilitat que millor s'ajusten a cada paràmetre (veure apartat 4, Caracterització de les variables).

2.4. Anàlisi teòric de sensibilitat

A la vista de la fórmula que s'ha obtingut per a l'augment de la capacitat d'un peatge en sèrie respecte un peatge habitual, es pot estudiar com influeixen cadascun dels paràmetres que hi apareixen, fent un anàlisi de sensibilitat, per tal de determinar en quin rang es pot trobar aquesta millora i així saber l'abast del sistema de peatges en sèrie. A més es podrà determinar en quins casos serà òptim i en quins casos serà inservible la idea de peatge en sèrie, passant per totes les situacions intermitges.

Així doncs, considerant la fórmula pel percentatge d'augment de capacitat, $\Delta C(\%)$:

$$\Delta C(\%) = 100 \cdot \left(\frac{C'}{C} - 1 \right) = 100 \cdot \left(\frac{2 \cdot E(H)}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max\{H_2, H_1\})} - 1 \right) \quad [12]$$

Es pren el terme més important, el qual determina el factor pel qual es multiplica la capacitat del peatge habitual per obtenir la del peatge en sèrie, és a dir, el quocient entre la capacitat del peatge en sèrie i de l'habitual:

$$\frac{C'}{C} = \frac{\frac{2}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max\{H_2, H_1\})}}{\frac{1}{E(H)}} \quad [13]$$

Arreglant l'expressió:

$$\frac{C'}{C} = \frac{2 \cdot E(H)}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max\{H_2, H_1\})} \quad [14]$$

Reordenant els termes:

$$\frac{C'}{C} = \frac{2}{\frac{E(R) + E(\Delta M)}{E(H)} + \frac{E(\max\{H_1, H_2\})}{E(H)}} \quad [15]$$

A partir d'aquí es defineixen dos factors en funció de la seva naturalesa:

$$\frac{C'}{C} = \frac{2}{\chi_1 + \chi_2} \quad [16]$$

Factor 1 (χ_1)

$$\chi_1 = \frac{E(R) + E(\Delta M)}{E(H)} \quad [17]$$

R: temps de reacció.

ΔM : temps de posicionament extra pel cas de cabines en tàndem.

H: *headway* (temps de reacció+temps de posicionament+temps de servei).

Aquest factor depèn del tipus d'usuari o conductor, del tipus de vehicle, del dia, de la franja horària, de les condicions climàtiques i del tipus de cabina de pagament.

Tenint en compte que $H=R+M+S$ i la linealitat de l'esperança matemàtica, es pot reescriure el factor 1 com:

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \frac{E(R) + E(\Delta M)}{E(H)} = \frac{E(R) + E(\Delta M)}{E(R) + E(M) + E(S)} \\ &= \frac{1}{\frac{E(R) + E(M)}{E(R) + E(\Delta M)} + \frac{E(S)}{E(R) + E(\Delta M)}} \end{aligned} \quad [18]$$

Així apareixen a l'expressió dos factors diferenciats quant a la seva naturalesa:

$$\frac{E(R) + E(M)}{E(R) + E(\Delta M)}$$

Depèn únicament del tipus d'usuari, de vehicle, del dia, de la franja horària i de les condicions climàtiques. És independent del tipus de cabina que s'utilitzi.

Com que $E(M) \geq E(\Delta M)$, aquest quocient no pot ser menor que 1 i, a la vista de dades de camp, difícilment serà més gran que 2. Es pot considerar constant per tots els peatges i a través de presa de dades

s'arriba a la conclusió que és aproximadament igual a 1,6 (a partir de dades de l'apartat 4, Caracterització de les variables).

$$\frac{E(S)}{E(R)+E(\Delta M)}$$

Depèn dels mateixos termes que l'anterior i, a més, del tipus de cabina de pagament, és a dir, si és manual, automàtica, de recollida de tiquet, etc.

Aquest terme es troba comprès entre 0 i ∞ . I, considerant que el seu denominador és gairebé constant per tots els peatges i aproximadament igual a 3,7 segons (dades de l'apartat 4), s'arriba a la conclusió que es pot reescriure com (treballant amb segons):

$$\frac{E(S)}{E(R)+E(\Delta M)} \cong \frac{E(S)}{3,7} \quad [19]$$

Així doncs, l'expressió del factor 1 queda de la següent forma (treballant amb segons):

$$\chi_1 = \frac{1}{\frac{E(R)+E(M)}{E(R)+E(\Delta M)} + \frac{E(S)}{E(R)+E(\Delta M)}} \cong \frac{1}{1,6 + \frac{E(S)}{3,7}} \quad [20]$$

Amb això s'aconsegueix deixar l'expressió en funció del temps de servei o temps de pagament de la cabina de peatge per tal de poder aplicar l'expressió a diferents tipus de cabines, ja no només a diferents tipus de servidors dins del sistema d'autopistes catalanes, sinó als diferents tipus de peatges que hi ha arreu del món, ja que cadascú té els seus temps de servei en funció de la forma de pagament (siguin túnels, ponts, autopistes, etc.). S'han considerat constants les esperances dels temps de reacció i de posicionament, els quals no variaran gaire d'un cas a un altre, ja que depenen més del tipus d'usuari que de la infraestructura.

A partir de l'estudi de cadascun dels dos termes que conformen el factor 1, s'arriba a la conclusió que:

$$0 < \chi_1 < 1 \quad [21]$$

Essent el límit inferior 0 el cas utòpic en què el temps de reacció i de posicionament siguin gairebé nuls o que el temps de servei compleixi $E(S) \gg E(R) + E(\Delta M)$.

El límit superior igual a 1, per la seva banda, prové de casos en que el temps de servei sigui $E(S) \ll E(R) + E(\Delta M)$ i que el terme $\frac{E(R)+E(M)}{E(R)+E(\Delta M)}$ prengui el valor del seu límit inferior 1.

A la vista dels termes que influeixen en el factor 1, es pot arribar a la conclusió que les cabines de pagament manual són les que tenen un valor més petit de χ_1 , ja que tenen una esperança del temps de servei més gran. Les cabines automàtiques prendran valors més grans de χ_1 , ja que el temps de servei és inferior al manual. Per la seva banda, les cabines de recollida de tiquet són el tipus de cabina que pren un valor més gran d'aquest factor, ja que el vehicle necessita menys temps de parada.

Tenint en compte com influeix el factor 1 en l'augment de capacitat del peatge en sèrie respecte a l'habitual (es troba sumant al denominador), es dedueix fàcilment que, si només es té en compte χ_1 , a qui beneficia més la idea de peatge en línia és a les cabines manuals.

Factor 2 (χ_2)

$$\chi_2 = \frac{E(\max[H_1, H_2])}{E(H)} \quad [22]$$

De forma teòrica es pot fer el següent desenvolupament:

Sigui t la variable positiva que representa el *headway*, $f(t)$ la funció de densitat de probabilitat del *headway* i $F(t_0)$ la funció de probabilitat acumulada, és a dir, $F(t_0) = P(t \leq t_0)$.

$$F(t_0) = \int_0^{t_0} f(t) dt \Rightarrow F'(t_0) = f(t_0) \quad [23]$$

Aleshores per calcular el $E(H)$ es procedeix de la següent forma:

$$E(H) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad [24]$$

En canvi, per a trobar $E(\max[H_1, H_2])$ s'ha de tenir en compte que la funció de densitat de probabilitat no serà la mateixa que per a H . Per trobar-la, se sap que la corba de probabilitat acumulada pel $\max[H_1, H_2]$ és el producte de les corbes de probabilitat acumulada de H_1 i H_2 (els *headway* de les dues cabines d'un mateix tàndem). Si aquests *headways* es consideren associats a una mateixa distribució de probabilitat igual al *headway* de la cabina habitual (H), $H_1 = H_2 = H$, llavors la corba de probabilitat acumulada per al $\max[H_1, H_2]$ és $F(t_0) \cdot F(t_0) = F(t_0)^2$ i s'arriba al següent raonament per a trobar la funció de densitat de probabilitat:

$$F^2(t_0) = \left[\int_0^{t_0} f(t) dt \right]^2 \quad [25]$$

Derivant i tenint en compte la regla de la cadena:

$$[F^2(t_0)]' = 2 \cdot F(t_0) \cdot F'(t_0) = 2 \cdot F(t_0) \cdot f(t_0) \quad [26]$$

Que és directament la funció de densitat de probabilitat per a $\max[H_1, H_2]$. Llavors:

$$E(\max[H_1, H_2]) = \int_0^{\infty} t_0 \cdot [F^2(t_0)]' dt_0 = 2 \cdot \int_0^{\infty} t_0 \cdot F(t_0) \cdot f(t_0) dt_0 \quad [27]$$

A partir d'aquí es pot reescriure el factor 2 com:

$$\chi_2 = \frac{E(\max[H_1, H_2])}{E(H)} = \frac{2 \cdot \int_0^{\infty} t_0 \cdot F(t_0) \cdot f(t_0) dt_0}{\int_0^{\infty} t_0 \cdot f(t_0) dt_0} \quad [28]$$

A través d'aquesta expressió, es pot determinar el factor 2 si es coneix l'expressió analítica que defineix la funció de probabilitat del *headway*.

Aquest resultat és molt interessant, però poc útil a la realitat ja que o no es coneix la funció de probabilitat del *headway* o les integrals a resoldre resultaran molt difícils o inclús no resolubles analíticament. Així doncs, s'ha optat per la cerca d'una expressió simplificada i aproximada que resulti més útil i senzilla. A través de dades obtingudes experimentalment per a diferents distribucions de probabilitat (log-normal, exponencial, gamma, log-logistics, etc. totes elles corresponents a valors positius, ja que s'estan representant temps) es pot traçar el següent gràfic a on es representa el factor 2 en funció del quocient σ/μ (desviació estàndard del *headway* entre la seva esperança matemàtica; anomenat d'ara en endavant coeficient de dispersió):

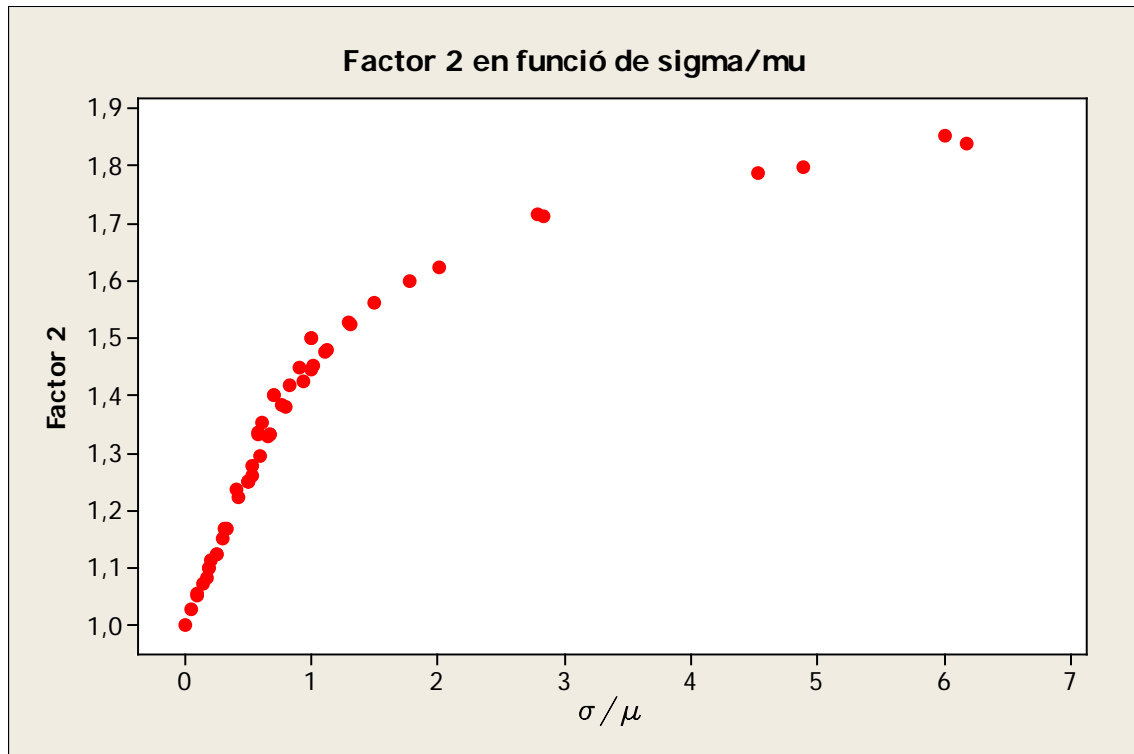


Figura 18: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió.

A la vista de la figura, es desprèn que, tot i que existeix una petita dispersió de punts la qual prové del tipus de distribució de probabilitat usada, principalment el factor 2 depèn del quocient σ/μ .

Aquest resultat és de gran importància ja que estalvia la necessitat de disposar de l'expressió analítica corresponent a la funció de probabilitat del *headway*, necessitant únicament el coeficient de dispersió σ/μ , o el que és el mateix, el valor de l'esperança i la desviació estàndard del *headway*.

Així es pot arribar a trobar una expressió que approximi el factor 2 i que només depengui de σ/μ . S'ha aproximat la corba que s'ha obtingut de forma experimental i s'arriba a la conclusió que l'expressió que més s'hi adiu i, a més de forma conservadora, és la següent:

$$\chi_2 = \frac{E(\max[H_1, H_2])}{E(H)} \cong \frac{-1}{1 + \frac{4}{5} \frac{\sigma}{\mu}} + 2 \quad [29]$$

On,

σ : és la desviació estàndard del *headway*, H .

μ : és l'esperança del *headway*, $\mu = E(H)$.

A continuació es mostra gràficament aquesta aproximació (en vermell) i la corba experimental del factor 2 (en negre) i s'aprecia la relativa bondat de l'aproximació:

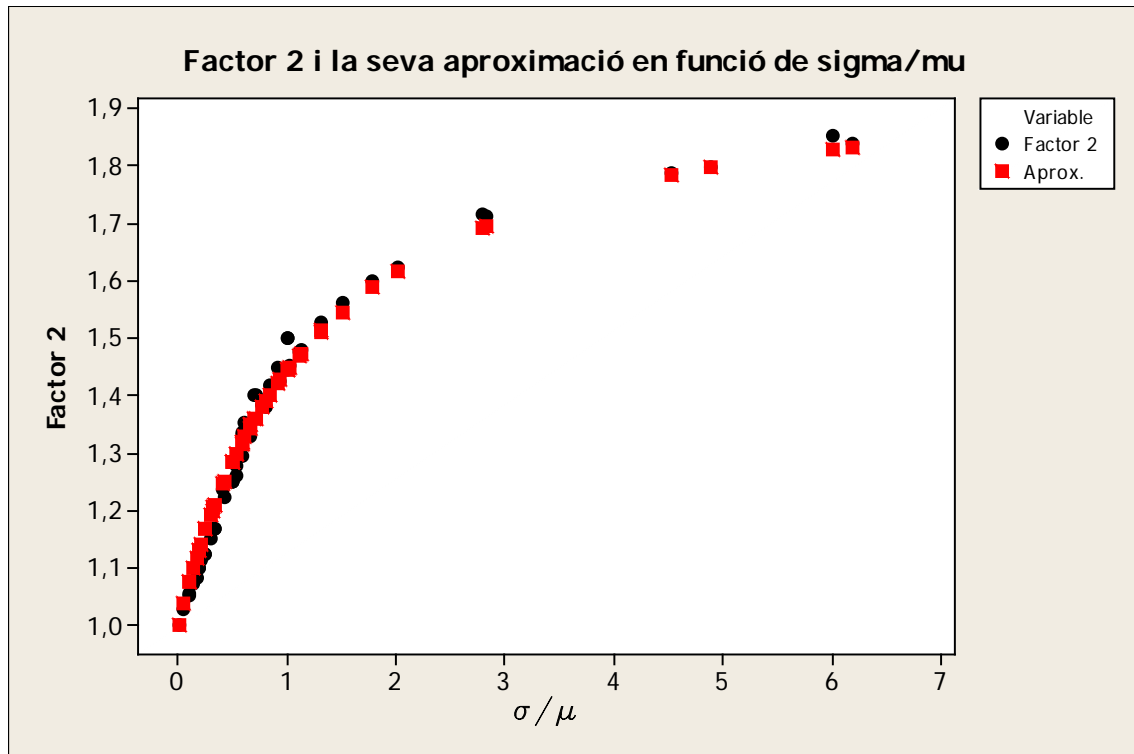


Figura 19: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió i la seva aproximació.

Observant de forma ampliada la zona més raonable amb els valors reals, és a dir, valors de σ/μ menors que 3, s'obté la següent figura.

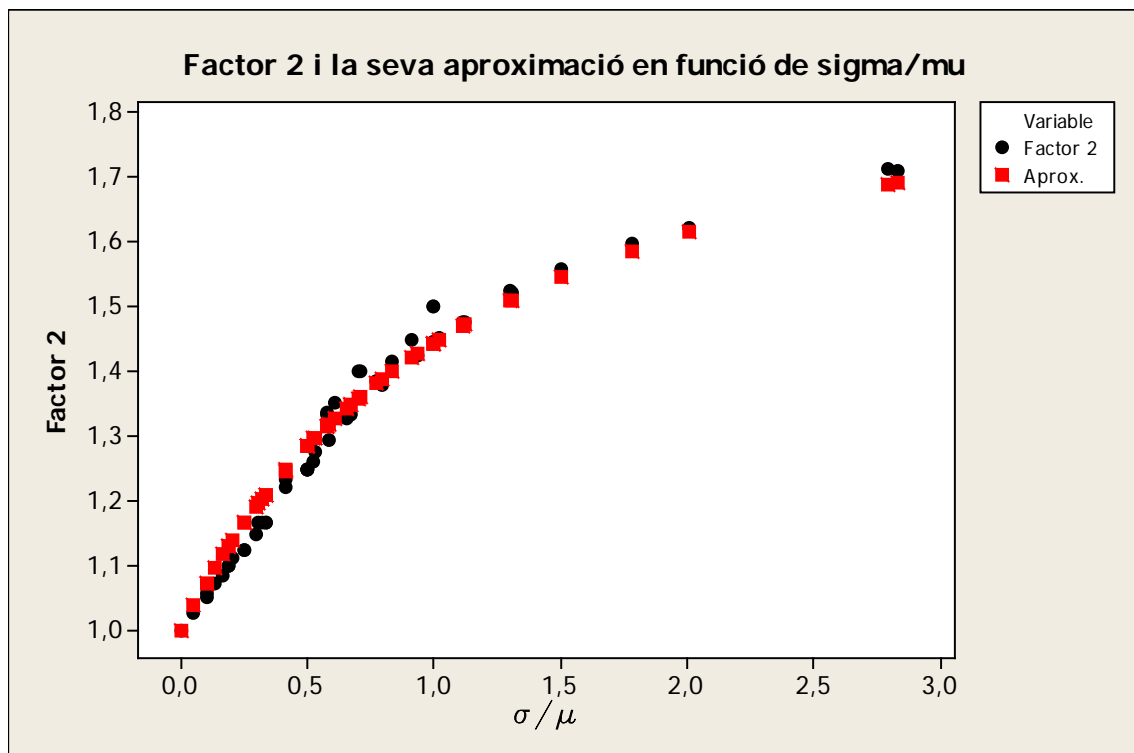


Figura 20: Gràfic del factor 2 en funció del coeficient de dispersió i la seva aproximació (zoom).

Amb això s'aconsegueix una expressió pel factor 2 que només depèn de σ i μ del *headway* (H) i no depèn del tipus de distribució que adopti H, així que es simplifiquen

els càlculs de forma important. Aquests valors es poden obtenir directament de dades de camp per al peatge que es pretengui estudiar (els valors variaran en funció del tipus de peatge).

L'interval de valors que pot assolir χ_2 és el següent:

$$1 < \chi_2 < 2 \quad [30]$$

La cota inferior de 1 es dona quan el valor de σ/μ és zero, és a dir, en casos en que el *headway* no té dispersió (és constant). Això és impossible en transports, podent arribar a ser possible en sistemes de línies de fabricació per indústries.

La cota superior de 2 correspon a valors del *headway* amb dispersió molt més gran que el valor mig, és a dir, $\frac{\sigma}{\mu} \approx \infty$. Aquest cas tampoc és coherent amb la realitat del sistema de peatges. Així doncs, els valors mes usuals es trobaran entre aquests dos extrems.

Tenint en compte aquestes idees, es pot arribar a la conclusió que les cabines de pagament manual són les que tenen un valor més gran de χ_2 , ja que tenen una dispersió en el temps de servei, i per tant en el *headway*, més gran. Això és així perquè intervenen dos persones en el procés, augmentant-ne la variabilitat. Les cabines automàtiques prendran valors més petits de χ_2 , ja que el temps de servei té menys dispersió, pel fet de ser un procés dut a terme per una sola persona i un operador automàtic. Les cabines de recollida de tiquet són el tipus de cabina que pren un valor més petit d'aquest factor, ja que el temps associat al procés de recollida de tiquet és el que menys dispersió té per la seva simplicitat.

Tenint en compte com influeix el factor 2, χ_2 , en l'augment de capacitat del peatge en sèrie respecte a l'habitual (està sumant al denominador), es dedueix fàcilment que, si només es té en compte aquest factor, a qui beneficia més la idea de peatge en línia és a les cabines de recollida de tiquet.

Factor de mal ús (φ)

Un dels inconvenients del peatge en sèrie és l'anomenat factor de mal ús (veure'n l'explicació a 1.3, Debilitats). Aquest factor que representa el tant per u de vehicles que no utilitzen correctament el peatge en tàndem es pot introduir a l'expressió de la millora de capacitat de la següent forma:

$$\frac{c'}{c} = (1 - \varphi) \cdot \frac{2}{\chi_1 + \chi_2} + \varphi \quad [31]$$

En el cas que el factor de mal ús sigui nul, es tindrà la millora de capacitat ideal del peatge en sèrie. D'altra banda, quan φ prengui el seu valor màxim igual a 1, es tindrà que la millora és nul·la, la qual cosa implica que està funcionant com un peatge habitual d'una sola cabina per carril.

Expressió general

Tenint en compte tot el que s'ha exposat anteriorment, s'arriba a l'expressió següent que només depèn de quatre variables principals:

$$\frac{C'}{C} = (1 - \varphi) \cdot \left[\frac{2}{\frac{1}{1,6 + \frac{E(S)}{3,7}} - \frac{1}{1 + \frac{4}{5} \frac{\sigma}{\mu}} + 2} \right] + \varphi \quad [32]$$

Essent:

φ : factor de mal ús (equival al tant per u de vehicles que no utilitzen correctament el peatge en sèrie).

σ : desviació estàndard del *headway* H.

μ : esperança matemàtica del valor del *headway*, E(H).

E(S): esperança del valor del temps de servei o temps de parada (en segons).

Adaptant l'expressió per trobar el percentatge de millora de capacitat es té:

$$\Delta C(\%) = 100 \cdot \left((1 - \varphi) \cdot \left[\frac{2}{\frac{1}{1,6 + \frac{E(S)}{3,7}} - \frac{1}{1 + \frac{4}{5} \frac{\sigma}{\mu}} + 2} \right] + \varphi - 1 \right) \quad [33]$$

I arreglant l'expressió traient factor comú s'arriba a la fórmula simplificada:

$$\Delta C(\%) = 100 \cdot (1 - \varphi) \cdot \left[\frac{2}{\frac{1}{1,6 + \frac{E(S)}{3,7}} - \frac{1}{1 + \frac{4}{5} \frac{\sigma}{\mu}} + 2} - 1 \right] \quad [34]$$

Optimització

L'objectiu del peatge en sèrie es poder oferir la major capacitat possible, així, es pretén que $\frac{C'}{C}$ sigui màxim. Per aconseguir-ho, és necessari que tant el factor de mal ús (φ) com els dos factors que apareixen al denominador de l'expressió (χ_1 i χ_2) siguin mínims.

$$\frac{C'}{C} = (1 - \varphi) \cdot \frac{2}{\chi_1 + \chi_2} + \varphi \quad [31]$$

Tenint en compte que el factor de mal ús, φ , com a mínim prendrà el valor de 0, el factor χ_1 no pot ser menor de 0 i χ_2 està acotat inferiorment per 1, s'arriba a la conclusió que $\frac{C'}{C}$ té el seu valor màxim en 2.

Per l'altre banda, si es considera combinació més dolenta per la capacitat, és a dir, els valors màxims de χ_1 i χ_2 (1 i 2 respectivament) s'obté un mínim de $\frac{C'}{C}$ de 2/3.

És a dir, el quocient de la capacitat que ofereix el peatge en sèrie entre la capacitat que ofereix una cabina habitual (per carril) es troba comprés en el següent interval:

$$\frac{2}{3} \leq \frac{C'}{C} \leq 2 \quad [35]$$

Obtenint els augments corresponents en forma de percentatge, l'interval queda:

$$-33\% \leq \Delta C(\%) \leq 100\% \quad [36]$$

El mínim de $2/3$ és del tot negatiu pel peatge en sèrie, ja que no només no suposa una millora respecte el peatge habitual, sinó que empitjora la capacitat que ofereix. Aquest resultat teòric es produirà en casos en els que el temps de servei sigui molt curt en relació a la reacció i posicionament $E(S) \ll E(R) + E(\Delta M)$, i que la dispersió del *headway* sigui molt més gran que la seva esperança matemàtica $\frac{\sigma}{\mu} \approx \infty$.

D'altra banda, el resultat òptim de 2 es produirà en aquells casos que es dugin a terme serveis llargs $E(S) \gg E(R) + E(\Delta M)$ i es tingui molt poca dispersió en el *headway* $\frac{\sigma}{\mu} \approx 0$.

Si les quatre variables que es troben a l'expressió s'agrupen en tres, φ , $\frac{\sigma}{\mu}$ i $E(S)$, es pot representar gràficament com influeix cadascuna d'aquestes variables en el percentatge d'augment de capacitat.

Si es considera el factor de mal ús igual a zero i es representa el percentatge d'augment de capacitat en funció de σ/μ per a diferents valors de $E(S)$, s'obté la següent Figura 21:

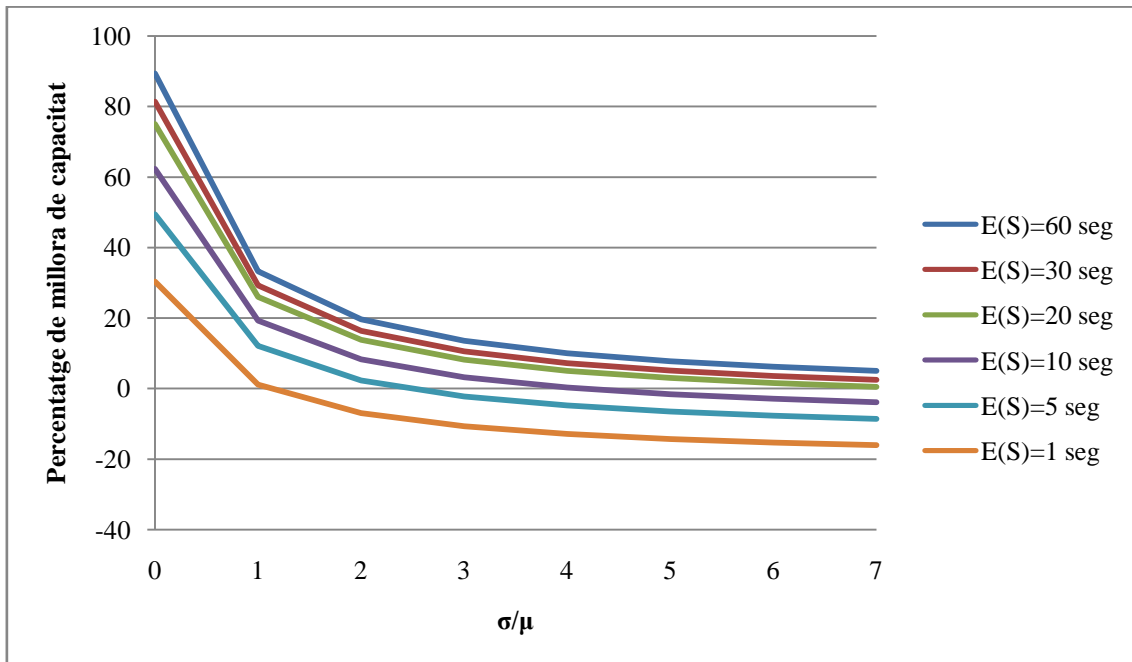


Figura 21: Percentatge de millora de capacitat en funció de σ/μ .

Si es considera el factor de mal ús igual a zero i es representa el percentatge d'augment de capacitat en funció de $E(S)$ per a diferents valors de σ/μ s'obté la següent Figura 22:

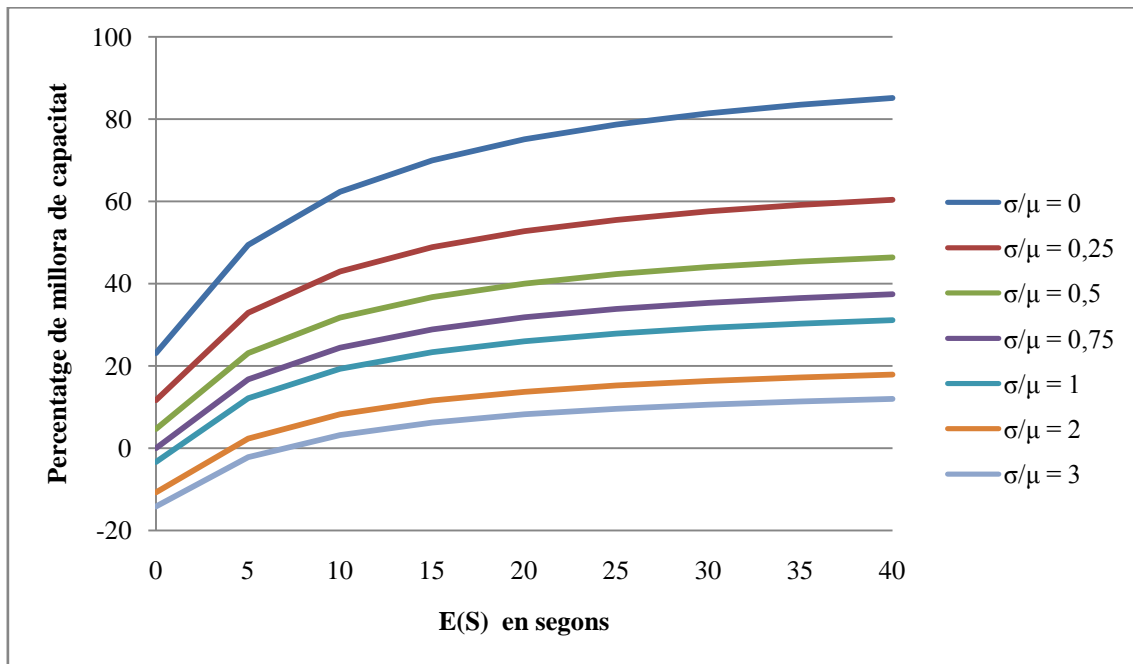


Figura 22: Percentatge de millora de capacitat en funció de $E(S)$.

Representant el percentatge d'augment de capacitat en funció del paràmetre de mal ús i suposant un valor habitual de $\sigma/\mu = 0,5$ s'obté la següent Figura 23:

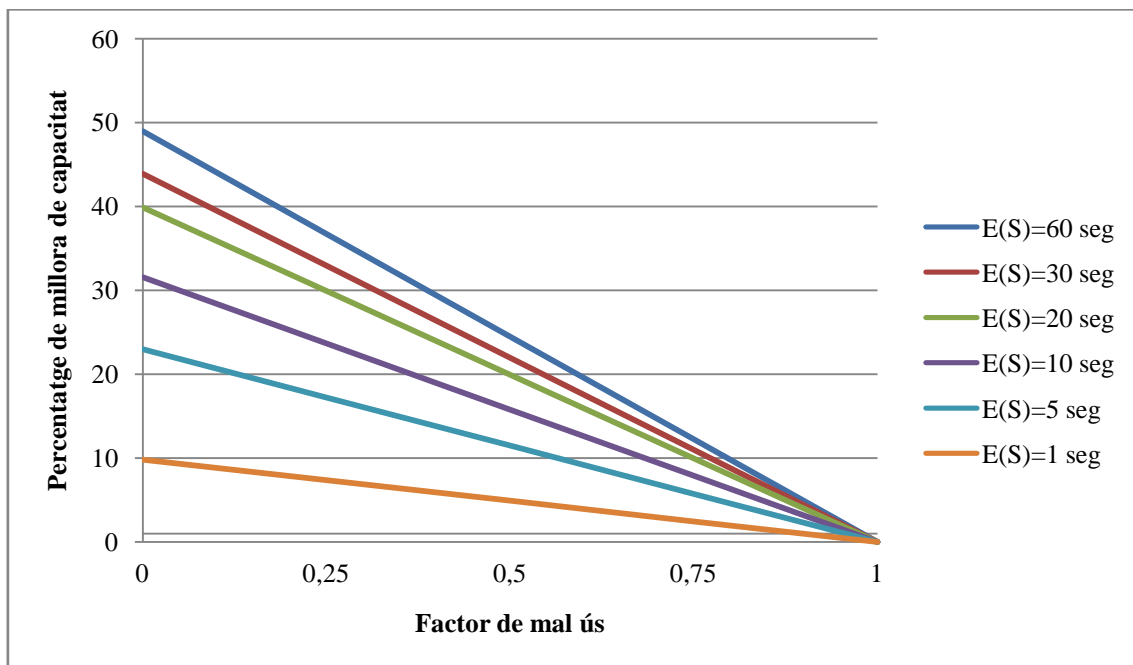


Figura 23: Percentatge de millora de capacitat en funció del factor de mal ús.

3. Eina de simulació

Amb motiu de tenir una altra referència en l'obtenció dels resultats que pot oferir la introducció del sistema de peatges en sèrie, s'ha creat, en exclusiva per aquesta tesina, un programa informàtic. Aquest ha estat elaborat en llenguatge C++ i consisteix en una simulació de Monte Carlo del funcionament micro del peatge tàndem.

Aquesta eina permet contrastar els resultats obtinguts amb la formulació analítica per tal de tenir dues metodologies que arribin a les mateixes conclusions i, a més, afegir altres variables d'interès (principalment relacionades al comportament dels usuaris del peatge) per a l'anàlisi en profunditat del peatge en línia. Amb aquestes es podran fer els anàlisis de sensibilitat corresponents i el plantejament dels escenaris que es desitgin.

A la Figura 24 es mostra el fuxograma esquemàtic d'aquesta eina de simulació.

Inputs

El programa consisteix en la creació d'un *toll plaza* a través d'uns inputs que es poden agrupar en cinc categories en funció de a què fan referència: relatius al *layout* del peatge, al flux d'arribada, als temps de servei, a la composició del trànsit i al comportament dels vehicles. També s'ha d'introduir el temps que es vol que sigui simulat.

Quant al *layout* del peatge, es dona la possibilitat d'escollir el nombre de carrils per a cada tipus de cabina (ViaT, automàtica i manual). Amb aquesta variable es pot aconseguir determinar el nombre necessari de cabines de cada tipus que requereix un peatge per tal que les cues no superin un cert límit. Així es podria garantir una qualitat de servei a l'usuari assegurant-li un temps màxim d'espera a la cua.

El flux d'arribada es determina a través de la generació d'interval·ls entre les arribades associats a una distribució de probabilitat que s'adeqüi a la situació del trànsit. Una altre opció es donar uns interval·ls constants entre les arribades dels vehicles; donant un valor petit a aquesta constant s'aconsegueix simular casos de congestió al peatge, equivalents a hores punta o operacions sortida o tornada, i així obtenir la capacitat màxima de servei que pot oferir el peatge. Aquesta variable permet modelar diferents estats del trànsit que corresponen a diverses franges horàries de diferents dies.

Quant al temps de servei, depèn de diversos factors com són el tipus d'usuari, l'hora del dia, etc. És per això que s'associa a una distribució de probabilitat obtinguda a partir d'un anàlisi estadístic de la presa de dades de camp. També es pot determinar la funció de distribució que equival als temps de reacció i als temps de posicionament. Tots ells basats en dades de camp.

Els inputs relatius a la composició del trànsit, fan referència a dos blocs: el percentatge de vehicles pesants i el percentatge de demanda de cada tipus de cabina (ViaT, automàtica o manual). Com ja s'ha comentat, el peatge en sèrie tant sols té sentit per

vehicles lleugers, és per això que només es tindrà en compte el flux d'arribada equivalent a vehicles lleugers i, per tant, el nombre de carrils necessaris per aquesta fracció del trànsit. El percentatge d'assignació de vehicles a cada tipus de pagament, influirà en la composició relativa del peatge de cada tipus de cabina. Aquesta dada anirà variant amb els anys, ja que la tendència (o almenys així es pretén) és augmentar la demanda del pagament ViaT, per així poder reduir les congestions ocasionades als peatges.

Un dels factors més importants a l'hora de fer un anàlisi de sensibilitat i poder obtenir uns resultats propers a la realitat del peatge en sèrie és el comportament de l'usuari en front a aquest nou sistema. A l'hora d'implantar un nou procés que han de realitzar les persones, no es pot esperar que aquestes el segueixin i executin a la perfecció, sempre hi ha factors vinculats al comportament humà que provocarà reaccions i actes totalment inesperats.

Dit d'una altra manera i aplicant-ho al cas del peatge en sèrie, no tots els vehicles utilitzaran el tàndem correctament. És a dir, com ja s'ha explicat, quan un vehicle arriba al *toll booth* en tàndem, si aquest disposa de les dues cabines lliures, s'ha d'aturar i realitzar el pagament a la cabina del fons (la segona que es troba en el sentit del flux) per tal de deixar lliure la més propera a l'entrada per al següent vehicle, però no tots els vehicles tindran aquest comportament, ja sigui per desconexença del funcionament o per altres motius. Hi haurà vehicles, doncs, que efectuaran el pagament al primer servidor que es trobin, impedit així que algú altre pugui utilitzar el servidor del fons. Això, òbviament, provoca una distorsió en el peatge en sèrie que el fa igual al peatge habitual, reduint-ne la capacitat que es pugui obtenir a través de formulacions teòriques. Aquest valor, però, no serà una constant al llarg de la vida de funcionament del peatge tàndem, essent màxim els primers mesos (degut a la desconexença del funcionament correcte per part de l'usuari) i reduint-se al llarg dels anys gràcies a l'experiència dels conductors. Tot i així, aquest terme tindrà una asímptota horitzontal, és a dir, mai baixarà d'un cert límit inferior, ja que sempre hi haurà algun vehicle estranger o novell que no es comportarà com correspon.

Al programa de simulació se li pot afegir aquesta variable a través d'un coeficient de mal ús. Aquest prendrà el valor de 0 quan tots els vehicles utilitzin correctament el tàndem (cas òptim) i valdrà 1 quan tots els vehicles l'utilitzin de forma errònia. Un avantatge d'aquesta variable és que permet, no només modelar el comportament de les persones en front al peatge en sèrie, sinó també poder simular un peatge habitual amb una sola cabina per carril. És a dir, si s'atorga el valor de 1 al coeficient de mal ús, tots els vehicles s'aturaran a la primera cabina impedit l'accés a l'altre cabina de la sèrie, anul·lant així la idea del peatge en línia i transformant-se el sistema en un peatge habitual. Així que no cal implementar dos programes, un per a peatge habitual i un per a peatge en sèrie, ni afegir una nova variable que ho determini, ja que es pot aprofitar el coeficient de mal ús amb aquesta finalitat.

Un altre aspecte relatiu al comportament dels vehicles és el de l'empaquetat, és a dir, els vehicles seleccionen un carril que no té perquè ser l'òptim en quant al temps que li comportarà en el sistema, amb això es produiran cues asimètriques entre cabines que poden provocar una reducció de la capacitat del peatge en relació a la teòrica. Aquesta variable s'introdueix al programa informàtic a través d'un coeficient d'empaquetament, el qual pren el valor de 1 si l'empaquetat és òptim i el valor de 0 si els vehicles seleccionen el carril de forma aleatòria. Tot i això, aquest factor no influirà de forma

significativa en la millora de capacitat que pugui oferir el peatge en sèrie respecte el peatge habitual, ja que afecta per igual a ambdós casos.

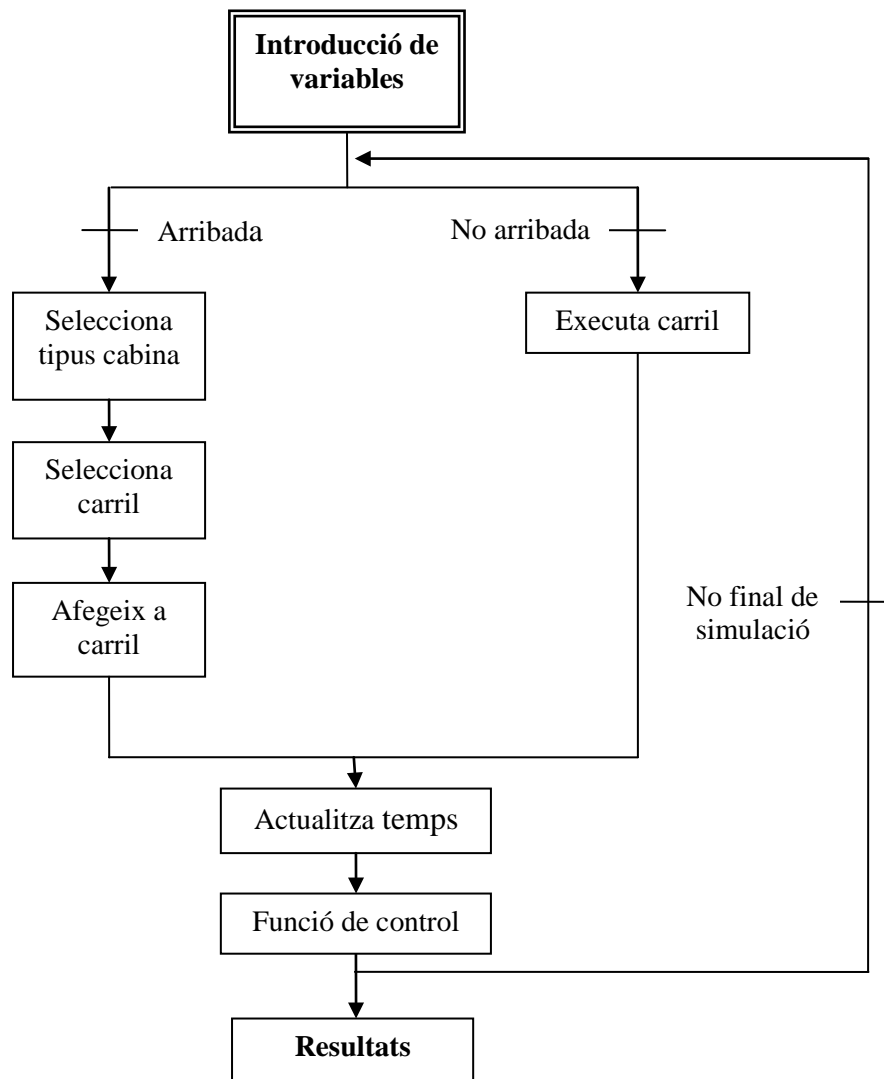


Figura 24: Fluxograma de l'eina de simulació.

Etapas del programa

Un cop estan determinats els inputs o entrades del sistema, el programa funciona segons l'esquema lògic que s'esquematitza a través d'un fluxograma a la Figura 24. Avançant en el temps entre successos, discernint entre arribades de vehicles al sistema o actualitzacions de posicions dels vehicles dins del sistema.

En les arribades al sistema el vehicle selecciona primer el tipus de pagament que vol realitzar (en funció del percentatge de demanda que se li hagi associat a cada tipus) i aleshores, dintre de les opcions que tingui per a efectuar aquell pagament, selecciona un carril. Aquí tindrà influència l'efecte del coeficient d'empaquetament. Un cop seleccionat el carril, es procedeix a afegir-hi el vehicle, ja sigui en posició d'espera a la cua o en posició de servei, segons l'estat del carril. Si pot accedir a posició de servei,

aleshores es situarà a una de les dues cabines del tàndem en funció del percentatge de mal ús que s'hagi determinat als inputs. Un cop aturat a la cabina corresponent, es genera un temps de servei per al vehicle, associat a la distribució de probabilitat que més s'adeqüi i independent amb els altres temps de servei generats fins el moment.

Si el succés no fos d'arribada de vehicle al sistema sinó un canvi d'estat del sistema (és a dir, algun vehicle acaba el servei) aleshores s'actualitzen les posicions, tant de servei com de la cua corresponent. I es generen, si és necessari, nous temps de servei per a vehicles que ocupin noves places de servei.

Un cop s'hagi dut a terme un d'aquest dos successos i s'hagi canviat l'estat del sistema, es realitza una actualització temporal, que correspon a avançar en el temps fins al proper succés. Aleshores es tornen a repetir les operacions anteriors. Això es fa mentre el temps del proper succés no superi la durada màxima que es desitja per a la simulació.

Outputs

Un cop acabada la simulació, s'obtenen els resultats relatius al procés que es desitgin. Entre aquests outputs hi ha l'estat del sistema per a cada instant temporal. Això inclou tant saber quines posicions de servei estan ocupades i quines no, com saber la longitud (en nombre de vehicles) de la cua de cada carril. També es pot obtenir la longitud de cua màxima que s'ha produït, el nombre de vehicles que han arribat al sistema, que han estat servits (que han sortit del sistema) i els que estan actualment a dins del sistema. Amb això es pot determinar la capacitat que ofereix el peatge en funció de les variables o inputs que s'hagin assignat, podent fer així un seguit d'anàlisis de sensibilitat per a saber el comportament del peatge amb precisió.

Temps de càlcul

El temps de càlcul necessari pel programa depèn, principalment, de la durada del flux de trànsit que es pretengui simular (trenta minuts, una hora, dues hores...) i de la intensitat d'aquest flux d'arribada de vehicles. A major nombre d'operacions per unitat de temps, major serà la durada de la simulació. Lògicament també augmenta en pretendre simular un *toll plaza* amb un gran nombre de cabines; no és el mateix simular un sol carril que simular un peatge sencer amb molts carrils (en el cas de la Roca del Vallès 36 carrils contant ambdós sentits de circulació). Els valors concrets van des de poc menys d'un minut per a representar un sol carril durant trenta minuts, fins a l'ordre de 10 minuts per a simulacions d'un *toll plaza* complet al llarg d'una hora.

Subrutines

A part de les etapes que es mostren a la Figura 24, hi ha una sèrie de subrutines que permeten el funcionament del conjunt.

Una d'elles és la inicialització de les variables auxiliars (no els inputs) del sistema cada vegada que s'executa el programa.

També n'hi ha una vinculada a la generació d'interval·ls de temps entre les arribades dels vehicles, aquest s'executa quan s'ha produït una arribada i aleshores genera en quin instant de temps es produirà la següent de forma independent a les anteriors arribades. Pot estar associada a una distribució de probabilitat o donar valors constants en funció del que es pretengui modelar.

Quant al temps de servei de cada vehicle, existeix una subrutina que el genera en cada instant que el vehicle s'atura al costat de la cabina o servidor. Aquesta genera temps

associats a una distribució de probabilitat adequada al tipus de cabina de pagament i sempre independent dels valors assignats als anteriors vehicles.

Hi ha una altra subrutina que calcula el carril amb mínima cua per tal d'ajudar als usuaris a seleccionar el carril a prendre.

S'ha implementat un altre element que atura la simulació en el cas que alguna de les cues superi un límit establert prèviament. Així s'evita seguir amb el procés en casos que no seran viables.

Procés de control

Per tal d'evitar incongruències i errors en la simulació i així poder confiar en els resultats que se n'obtenen, s'ha pres un conjunt de mesures.

Una d'elles és una subrutina de control inserida al propi programa, la qual consisteix en avaluar la conservació de vehicles (vinculat al teorema de conservació de la massa), realitzant una comparació entre la quantitat de vehicles arribats i de vehicles que estan al sistema i servits (els que han sortit). Aquest control es fa per cada instant de temps.

$$\text{N}^{\circ} \text{ vehicles arribats} = \text{N}^{\circ} \text{ vehicles servits} + \text{N}^{\circ} \text{ vehicles actualment en sistema}$$

Si no es compleix aquesta igualtat el vehicle atura la simulació a l'instant anunciant que no hi ha conservació de vehicles.

Comprovacions de funcionament

Una altra forma de comprovar que el programa funciona correctament i lògicament és elaborar una sèrie de proves de resultat obvi o predictable analíticament.

Paral·lelament al programa de simulació del peatge en sèrie, s'ha dissenyat també un software que simula el peatge habitual existent actualment a les autopistes, és a dir, amb una sola cabina de cobrament per *toll booth*. Com s'ha comentat anteriorment, la forma de simular el peatge habitual amb el software de peatge en sèrie és associant un valor màxim al coeficient de mal ús (és a dir, fent que el 100% dels vehicles que utilitzin el peatge en línia utilitzin únicament el primer servidor que es troben inutilitzant l'altre i anul·lant la idea de peatge tàndem). S'han comprovat els resultats obtinguts amb aquest procediment amb els obtinguts amb el programa de simulació específic per peatge habitual i coincideixen plenament, confirmant que la hipòtesi usada és correcta.

D'altra banda s'ha comprovat el resultat extrem per la millora de capacitat que ofereix el peatge en sèrie en front el peatge habitual. Aquest valor s'ha obtingut a partir del tractament analític de l'apartat 2.4 i correspon a un valor de millora del 100% en el cas que el valor del temps de servei o de parada sigui molt més gran que el de reacció i de posicionament (o el que és equivalent, assignant un valor de 0 al temps de reacció i de posicionament) i a més, la variabilitat en els temps de servei sigui nul·la, és a dir, que els temps de pagament s'associïn a una constant. Introduint aquestes dades al software s'obtenen capacitats per al peatge en línia (coeficient de mal ús igual a 0) corresponents al doble de les que s'obtenen considerant un peatge habitual (coeficient de mal ús igual a 1).

També s'ha contrastat diversos escenaris prenent el resultat obtingut amb la formulació analítica i el resultat obtingut a través de la simulació obtenint errors inferiors al 5%. En aquests escenaris s'ha variat tant el temps de servei i la seva dispersió (el que equival a escollir un tipus de cabina de pagament o un altre), com el coeficient de mal ús.

Així doncs, els resultats que s'obtenen amb la simulació a través del software creat específicament per a la tesina i la formulació analítica desenvolupada a tal efecte corresponen plenament i en tot el seu rang de valors, comportant això una seguretat i satisfacció que els resultats que se'n desprenguin seran no només coherents sinó també molt propers a la realitat.

Tot i així, no només ha de ser correcte la metodologia usada per a l'estudi, ja sigui formulació analítica o simulació de Montecarlo, sinó que també han de ser pròximes a la realitat les dades que s'usen per a obtenir els resultats. En un sistema com el del trànsit, hi ha una infinitat de factors que afecten a les variables i no es poden tenir tots en compte, així que s'ha de prendre els que tenen més influència en el resultat. A més, no son variables deterministes sinó que estan associades a distribucions de probabilitat, amb la qual cosa, prendre gran quantitat de dades prèvies a l'estudi i assimilar-les posteriorment amb cura a les distribucions més adequades és vital per tal de fer un estudi de forma correcta i realista.

4. Caracterització de les variables

Dins de les variables necessàries per analitzar el funcionament d'un peatge en línia es troben dos grans blocs: les vinculades a la teoria de cues i les vinculades a la composició del trànsit.

4.1. Variables relatives a la teoria de cues

Quant a les variables relatives a la teoria de cues existeix, com en tot sistema de cues, un temps de servei (necessari pel tractament dels usuaris del sistema) i un flux d'arribada (la forma en que arriben els usuaris al sistema). En aquesta tesina i degut a les característiques del trànsit, com ja s'ha comentat a l'apartat 2.3, es considerarà l'interval de temps existent entre dos vehicles tractats consecutivament (*headway*) desglossat en temps de reacció (R), temps de posicionament (M i ΔM) i temps de servei pròpiament dit o temps de parada (S) en el que el vehicle efectua el pagament de la taxa de peatge.

$$H = R + M + S \quad [1]$$

$$H' = R + \Delta M + \max \{ H_2, H_1 \} \quad [10]$$

Per la realització d'aquesta tesina s'ha dut a terme un treball de camp en el qual s'ha pres el temps de reacció, de posicionament i de servei de diversos vehicles al peatge de la Roca del Vallès que es troba a l'autopista AP7. Això es va fer el dia 19 de març de 2009 entre les 11:00 i les 13:00 del matí.

Aquestes variables no són deterministes sinó que tenen un caràcter aleatori o estocàstic i per tant tenen associades unes distribucions de probabilitat. El seu tractament estadístic ha estat realitzat amb un programa informàtic específic (Minitab 14) i s'analitza en profunditat a Annex A: Tractament estadístic de les variables. A continuació s'exposa el més rellevant de cadascuna d'aquestes variables.

Temps de reacció (R)

El temps de reacció depèn de molts paràmetres, entre els quals trobem l'edat, l'experiència, l'estat d'ànim, la franja horària, el dia, etc. Per això, no es pot considerar una variable determinista, sinó aleatòria. El valor més habitual i conservador que es pren en diverses literatures és entre 1,5 i 2 segons. Però es poden trobar valors inferiors a 1 segon i majors a 2 segons en funció dels esmentats paràmetres.

Els resultats obtinguts en el treball de camp esmentat són els que s'observen en l'histograma següent, el qual oscil·la entre 0,6 i 3,5 segons amb un valor mig de 1,7 segons:

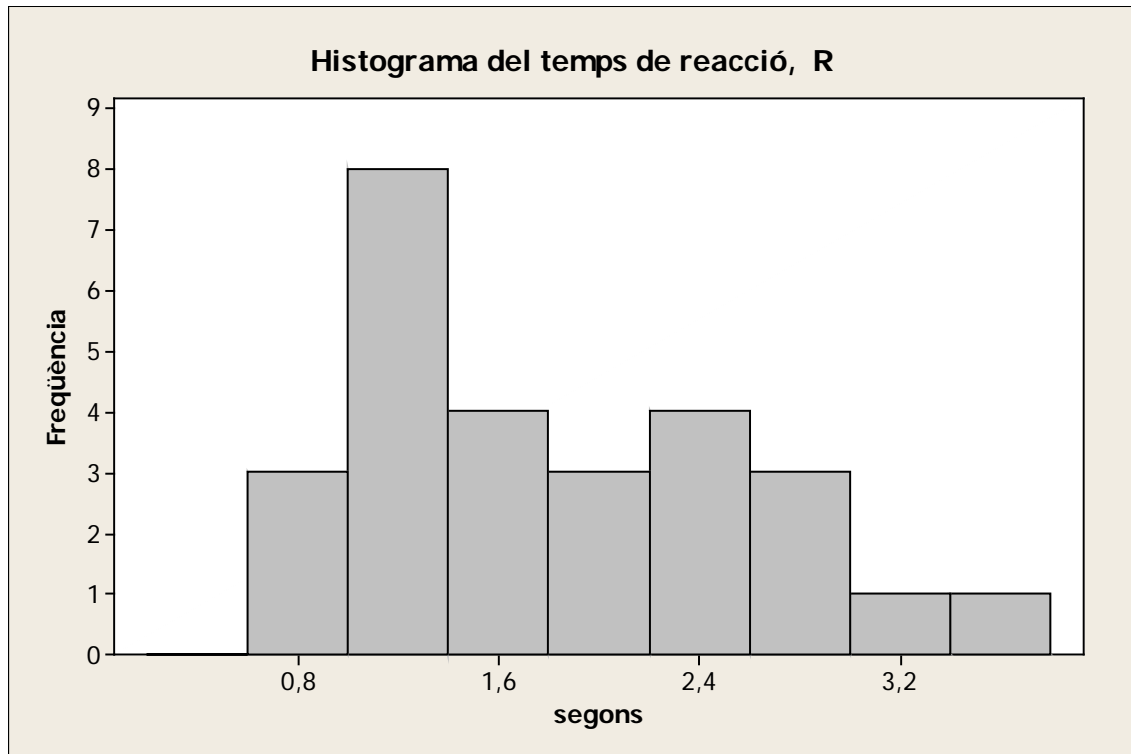


Figura 25: Histograma del temps de reacció, R.

Analitzant les dades s'obtenen els resultats presents a l'annex A i la conclusió que el millor ajust pel temps de reacció (R) és una distribució lognormal amb paràmetres 0,44 i 0,49 la qual presenta l'aspecte de la següent distribució de probabilitat:

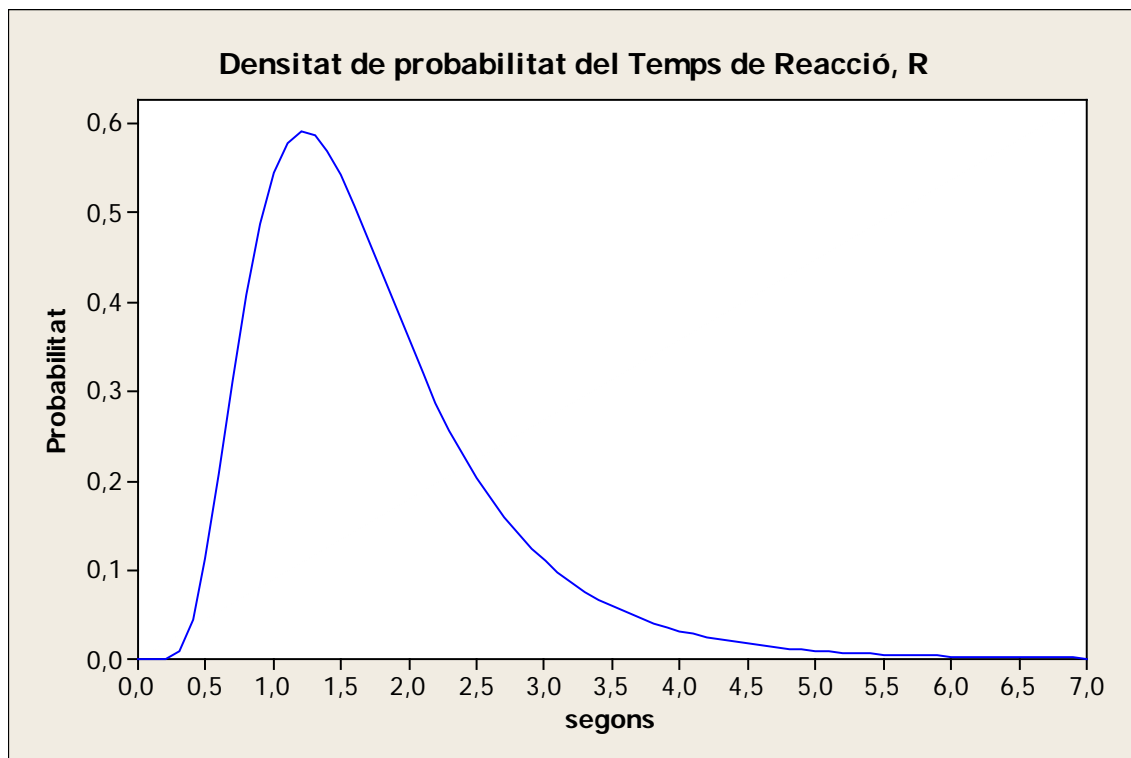


Figura 26: Densitat de probabilitat del temps de reacció, R.

A la vista d'aquest gràfic, s'observa que molt poca gent baixa de 0,3 segons i, per l'altre extrem, hi ha alguns casos en els que el temps de reacció és exagerat, degut a l'embadaliment ocasional d'alguns conductors.

Temps de posicionament (M , ΔM)

El temps de posicionament el separem en dues variables: M i ΔM . M consisteix en el temps entre que el vehicle arranca i s'atura desplaçant-se una distància equivalent a un vehicle (veure apartat 2.3). És l'equivalent als petges habituals. Per altre banda, ΔM és l'extra de temps que necessita un vehicle per a realitzar el desplaçament d'una distància equivalent a un vehicle de més. Aquest últim és únicament necessari per analitzar el procés d'un peatge en tàndem.

Temps de posicionament M

El temps de posicionament (M) s'ha extret del mateix treball de camp que ha servit per obtenir els temps de servei. S'han analitzat els temps de posicionament de diversos vehicles lleugers, ja que el peatge en sèrie no té sentit per vehicles pesants, i s'ha obtingut l'histograma següent on s'aprecia que oscil·la entre un mínim i un màxim de 2,9 i 5,7 segons respectivament, amb un valor mig de 4,3 segons.

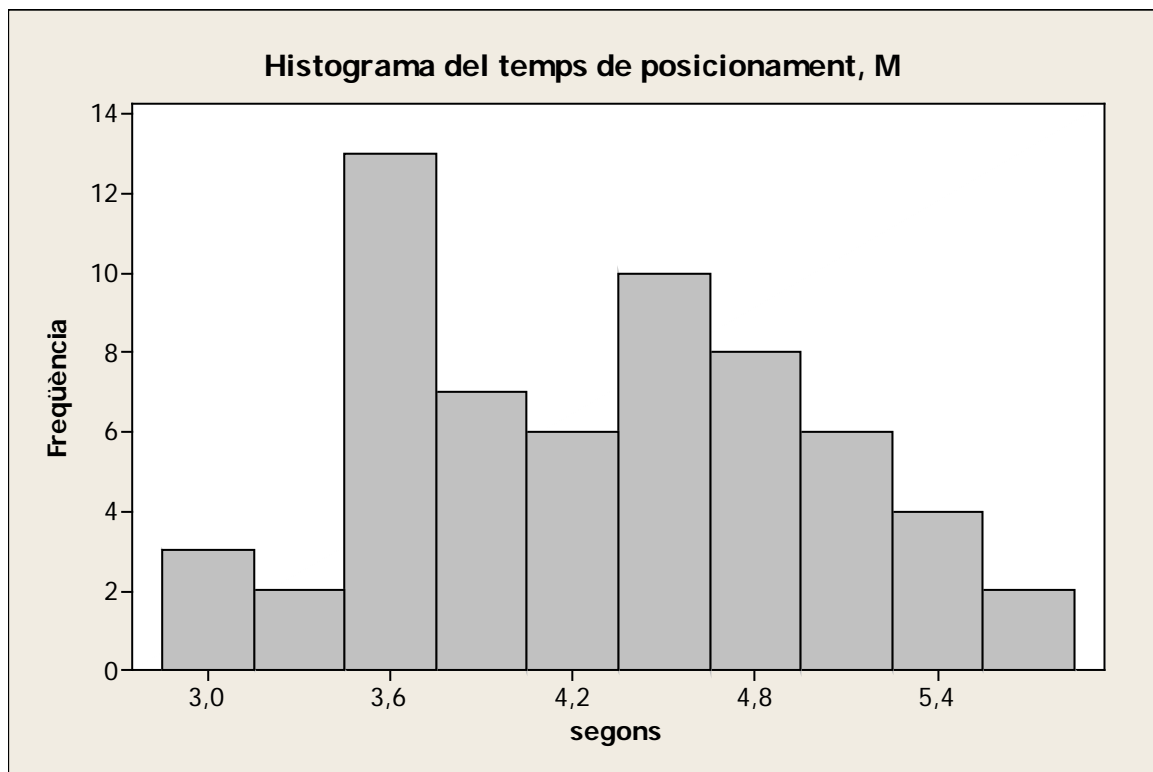


Figura 27: Histograma del temps de posicionament, M .

A partir del programa informàtic (Minitab 14) s'obtenen els resultats estadístics presents a l'annex A i s'arriba a la conclusió que el millor ajust per al temps de posicionament (M) és una distribució lognormal amb paràmetres 1,45 i 0,17 la qual presenta l'aspecte de la següent distribució de probabilitat:

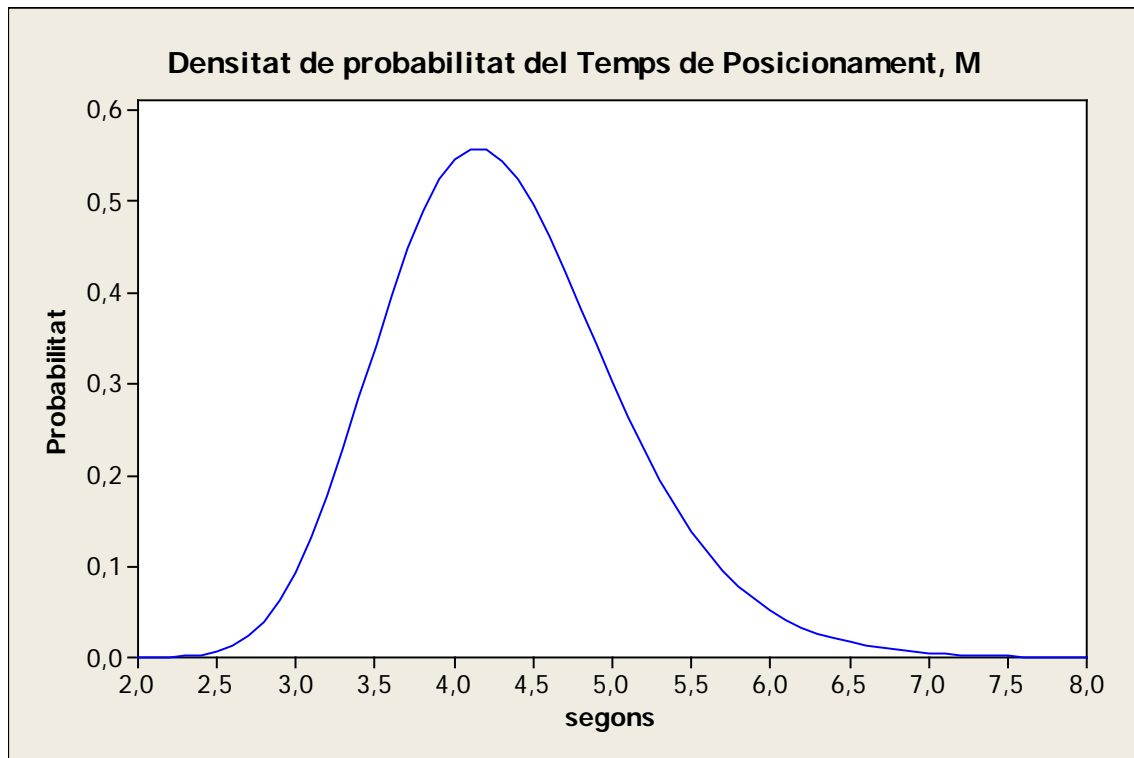


Figura 28: Densitat de probabilitat del temps de posicionament, M.

Com es pot apreciar apareixen valors entre 2,4 i 7,5 segons. No tots els vehicles triguen el mateix en posicionar-se a la cabina, depèn del tipus de conductor, de vehicle, de la climatologia (ja que si plou els vehicles van amb més compte), etc. Si consideréssim vehicles pesants hi hauria més dispersió cap a temps llargs, però com ja s'ha dit, només es consideren vehicles lleugers per a aquest estudi del peatge en tàndem.

Temps de posicionament ΔM

ΔM s'ha mesurat considerant el temps que tarden vehicles en marxa (però a velocitats moderades, és a dir, coherents al moviment a dins d'un carril de peatge) en desplaçar-se un espai equivalent a un vehicle. S'obté el següent histograma que oscil·la entre 1,5 i 2,7 segons amb un valor mig de 2,0 segons.

Com s'ha dit el valor mig és de 2 segons tot i que s'observa que l'interval més proper a 2 segons no té cap observació. Es considera aquest fet degut a una inexactitud causada pel nombre de mesures preses, ja que d'altra banda, correspondria a una distribució bimodal, la qual cosa no tindria sentit en aquest cas.

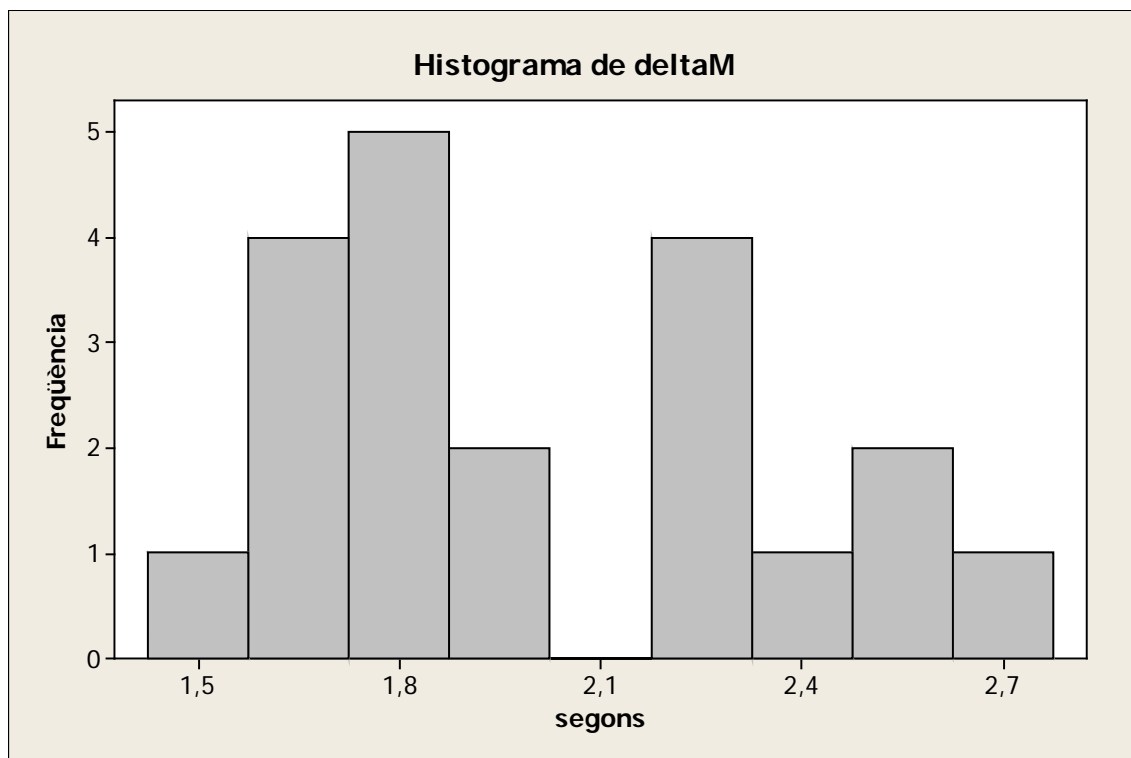


Figura 29: Histograma del temps de posicionament, ΔM .

Analitzant les dades s'obtenen els resultats presents a l'annex A i la conclusió que el millor ajust pel temps de posicionament ΔM és una lognormal amb paràmetres 0,68 i 0,17 la qual presenta l'aspecte de la següent distribució de probabilitat:

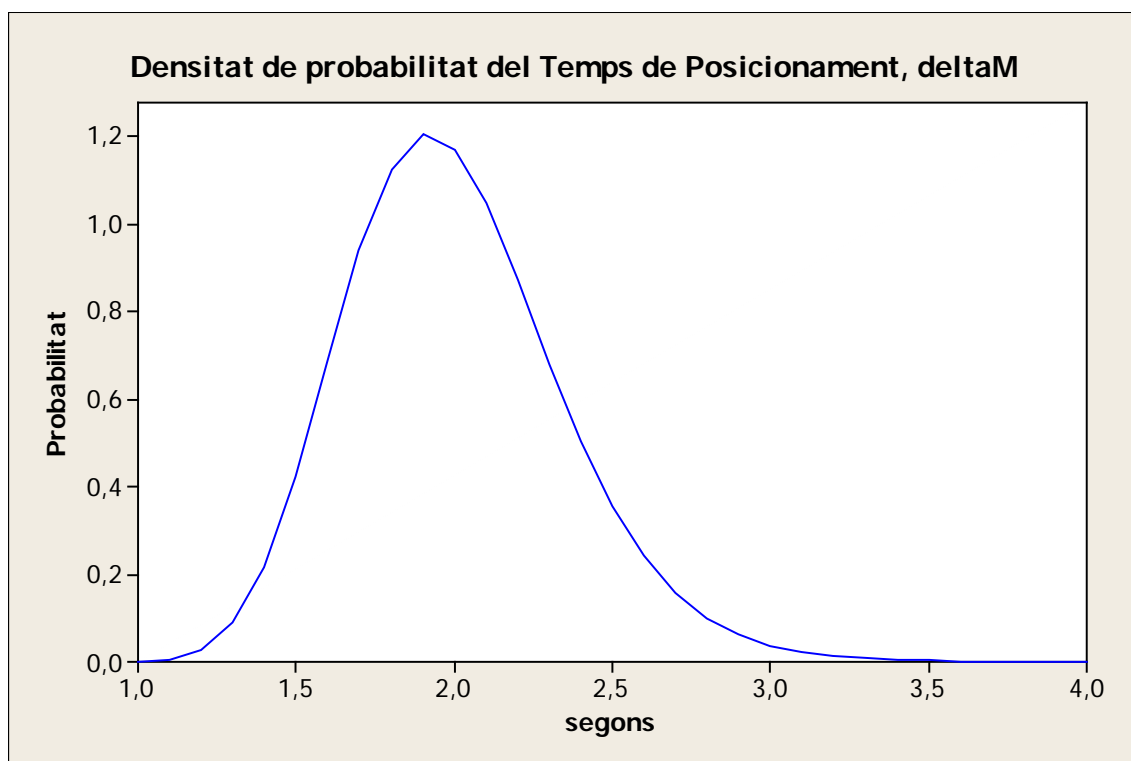


Figura 30: Densitat de probabilitat del temps de posicionament, ΔM .

Aquesta variable presenta menys variabilitat que la de M , prenent valors entre 1,1 i 3,5 segons aproximadament. Això és així perquè, en el factor ΔM intervé sobretot la velocitat de circulació pel carril del peatge, la qual no és la mateixa per a tots els vehicles i situacions, però sí que es bastant semblant. En canvi en el factor M intervé no només la velocitat sinó la acceleració, la qual varia més entre tipus de conductors (agressius o pausats), o climatologia (pluja, gelada...), etc.

Temps de servei o parada (S)

El temps de servei o temps de parada és el temps en el qual el vehicle està aturat efectuant el pagament de la taxa corresponent. Aquest depèn del tipus de cabina que s'està usant, és a dir, no és el mateix el temps per realitzar el pagament en una cabina manual que en una automàtica. Tampoc es tarda el mateix en les cabines de peatge tancat que en les de peatge obert. I dins de les de peatge tancat, no és el mateix una cabina de recollida de tiquet que una de pagament. També influeix en el temps de pagament la franja horària i el dia de la setmana, ja que, per exemple en hores punta d'un dia laborable es troba gran quantitat de *commuters* que acostumen a trigar menys.

En aquesta tesina es treballa amb unes dades de camp preses al peatge de la Roca del Vallès, el qual és un peatge tancat. En aquest es varen prendre dades dels temps de servei de les cabines de recollida de tiquet i de les de pagament. Aquest temps de pagament no és el mateix que en un peatge obert ja que en les de peatge tancat hi ha la necessitat d'entregar al servidor un tiquet previ al pagament, per tant comporta un temps de servei lleugerament superior.

Nombrosos texts (Soriguera, 2008), donen uns valors aproximats de temps de servei que queden recollits en la següent Taula 1:

| | Temps de servei (segons) |
|-------------------------------|--------------------------|
| Peatge Obert | |
| Cabina manual | 15 |
| Cabina automàtica | 12 |
| Peatge tancat | |
| Cabina manual de pagament | 20 |
| Cabina automàtica de pagament | 18 |
| Cabina de recollida de tiquet | 9 |

Taula 1: Temps de servei segons tipus de cabina de peatge [Font: abertis].

Les dades preses per aquesta tesina per al temps de servei estan extretes del treball de camp indicat anteriorment i són analitzades a continuació en funció del tipus de cabina de peatge tancat, ja sigui de pagament manual, pagament automàtic o de recollida de tiquet.

Temps de servei per cabina manual (S_m)

Els valors obtinguts pel temps de parada en cabines manuals es representen en el següent histograma. Com es pot apreciar els valors varien des de 4 a 42 segons amb un valor mig de 20,1 segons.

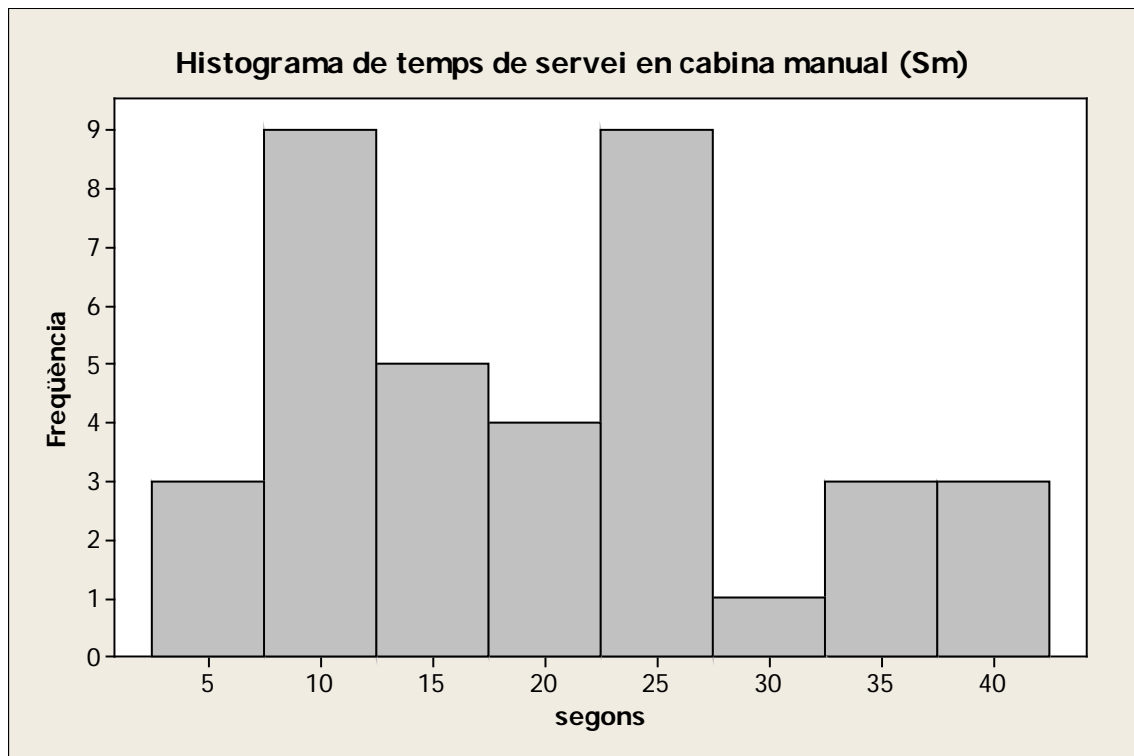


Figura 31: Histograma del temps de servei per cabina de pagament manual.

Analitzant les dades s'obtenen els resultats presents a l'annex A i la conclusió que el millor ajust pel temps S_m és una distribució lognormal amb paràmetres 2,85 i 0,59 la qual presenta l'aspecte de la següent funció de densitat de probabilitat:

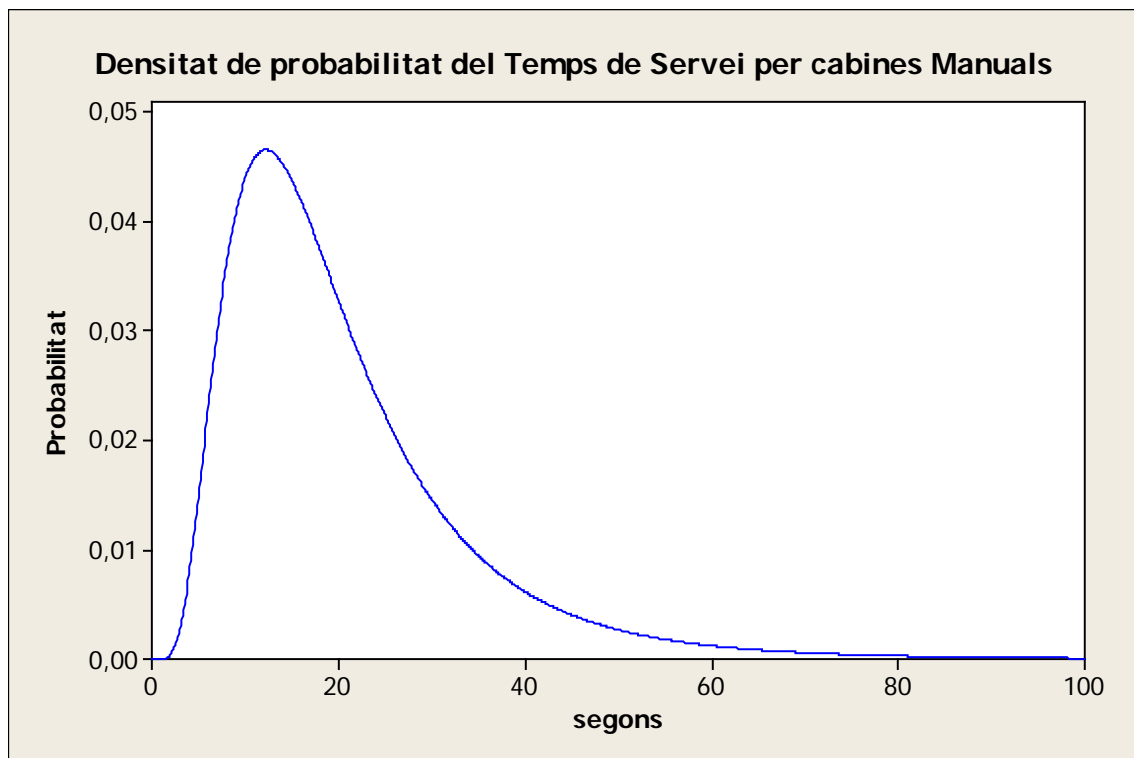


Figura 32: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de pagament manual.

Al gràfic s'observen valors per al temps de servei entre els tres segons i els dos minuts. El límit inferior és correcte ja que temps menors són impracticables per qualsevol usuari. I el límit superior (molt més dispers) és coherent amb els casos en que el vehicle s'equivoca de cabina, no li funciona la targeta correctament, etc. La franja intermitja que excedeix dels 40-50 segons és provocada per casos com el fet de ser conductor novell, no trobar la targeta/efectiu, que la targeta/efectiu caigui a terra, etc.

Temps de servei per cabina automàtica (S_a)

Els valors obtinguts pel temps de parada en el pagament en cabines automàtiques es representen en el següent histograma. Com es pot apreciar els valors varien des de 7 a 38 segons amb un valor mig de 15,3 segons.

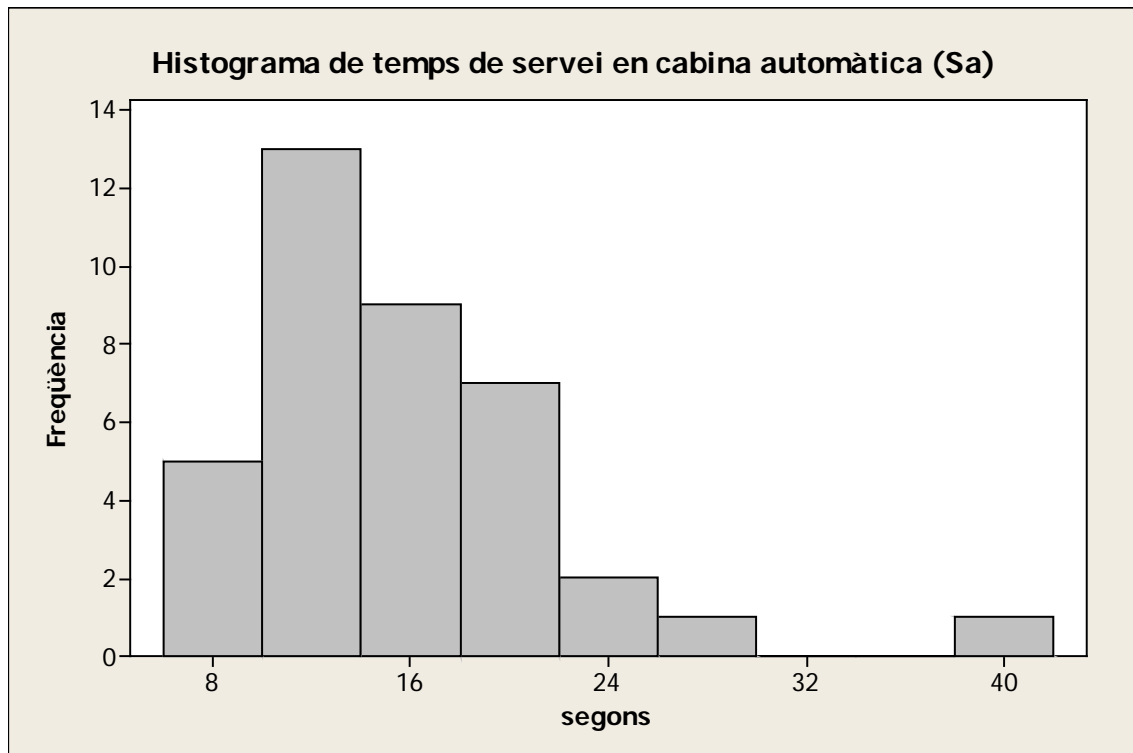


Figura 33: Histograma del temps de servei per cabina de pagament automàtic.

A partir del programa informàtic Minitab 14, s'obtenen els resultats estadístics presents a l'annex A i s'arriba a la conclusió que el millor ajust pel temps servei en cabines automàtiques (S_a) és una distribució lognormal amb paràmetres 2,67 i 0,35 la qual presenta la següent densitat de probabilitat:

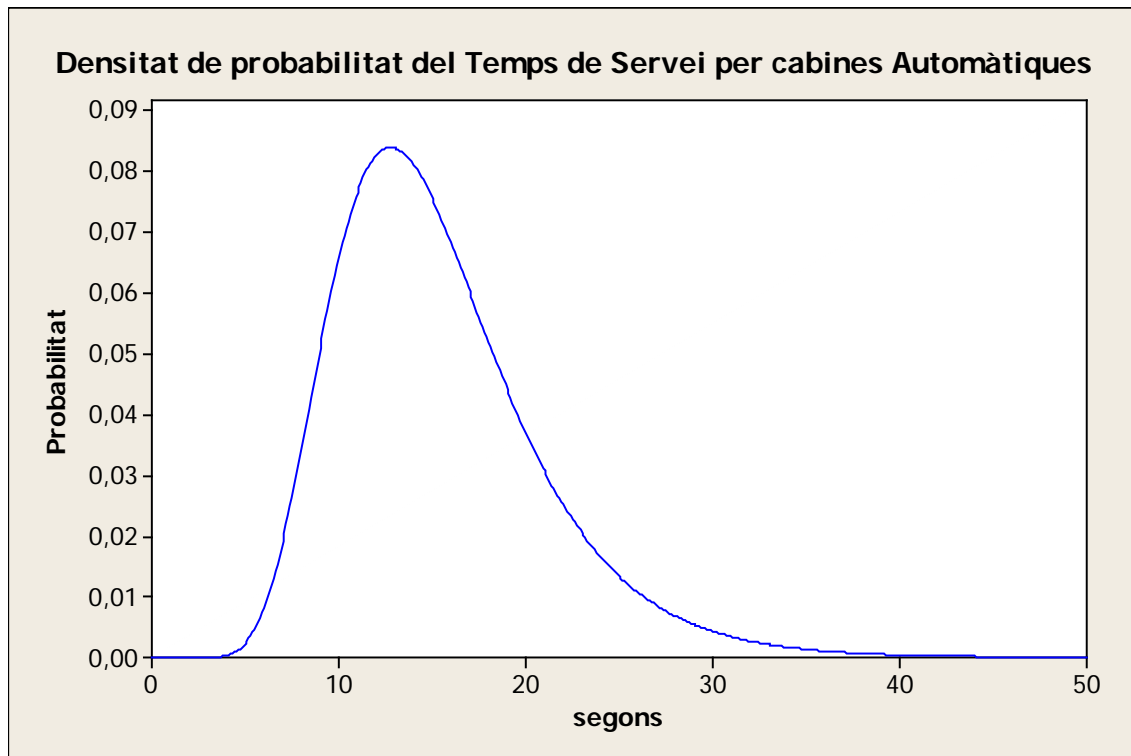


Figura 34: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de pagament automàtic.

En aquesta distribució s'observen els extrems inferior i superior de 3 i 50 segons respectivament. El límit inferior té el mateix significat que en el cas de S_m , ja que és físicament impossible realitzar el pagament en menys temps. El límit superior és menor que en el cas de cabina manual ja que els conductors que van a la cabina automàtica són conductors, en teoria, més preparats per al pagament, ja que són conscients que duen la targeta adequada. Però tot i així hi ha casos en els que la targeta no funciona o hi ha algun altre tipus de problema i, per tant, això comporta que s'hagi d'avisar al personal de l'àrea provocant demores de més de 40 segons.

Resumint, la variabilitat en el temps de servei de la cabina automàtica és menor al de la cabina manual ja que només hi ha un factor humà de variabilitat, el conductor. En canvi en les cabines manuals hi ha dos factors humans: el conductor i l'empleat del peatge.

Temps de servei per cabina de recollida de tiquet (S_r)

Al peatge de la Roca del Vallès, en direcció nord, les cabines són de recollida de tiquet, allí s'han pres les dades del temps de servei corresponent que s'adjunta a continuació en forma d'histograma. Els valors varien entre 3 i 9 segons, molt petits i amb poca variabilitat degut a la senzillesa del procés de recollir un tiquet d'un dispensador automàtic, a on no hi ha gairebé cap factor que pugui alterar-ne el temps de servei (a diferència de les cabines de pagament).

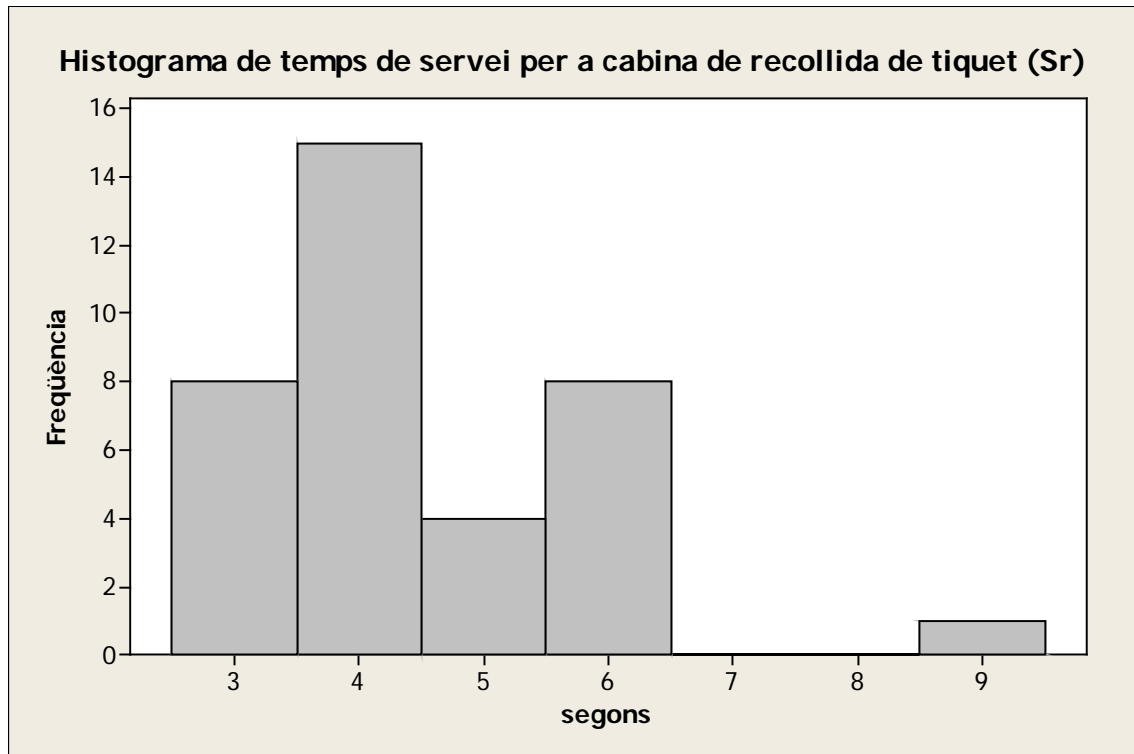


Figura 35: Histograma del temps de servei per cabina de recollida de tiquet.

Analitzant les dades (annex A) la conclusió és que el millor ajust pel temps S_m és una distribució lognormal amb paràmetres 1,46 i 0,27 la qual presenta la següent densitat de probabilitat:

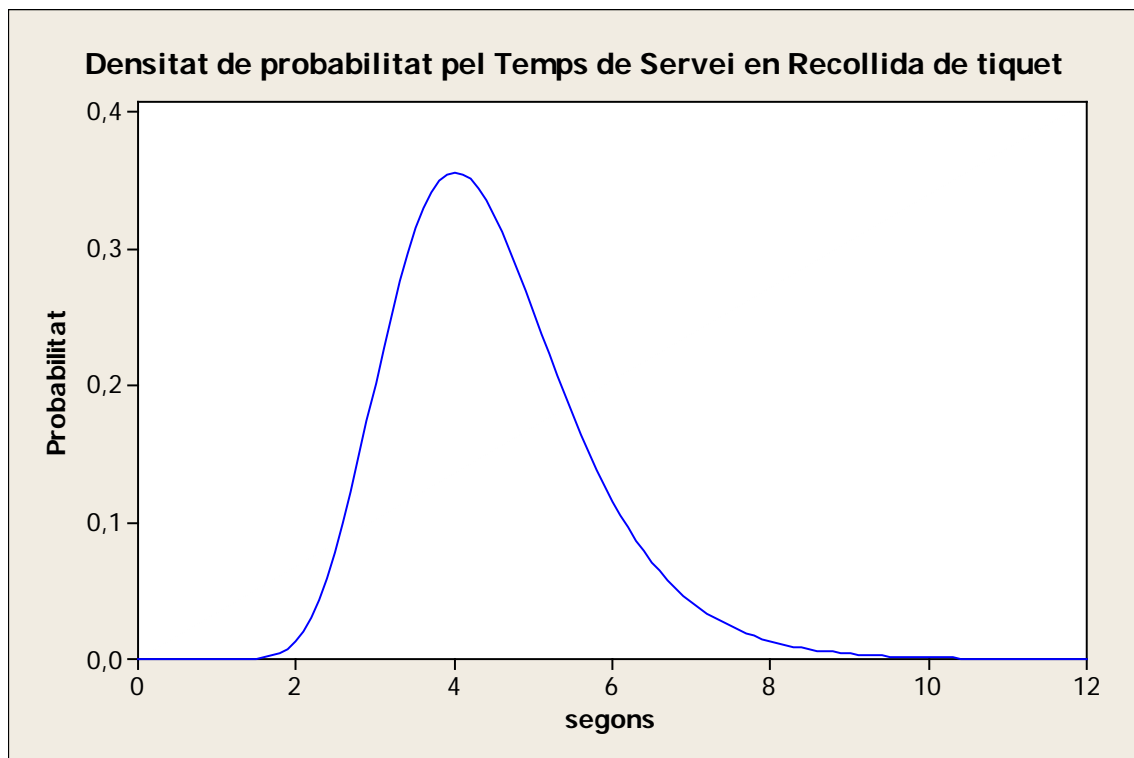


Figura 36: Densitat de probabilitat del temps de servei per cabina de recollida de tiquet.

Aquesta distribució lognormal varia entre els 2 i els 10 segons. Els valors són molt inferiors als obtinguts en els altres tipus de cabines degut a que aquesta tant sols comporta la tasca de recollir un tiquet del servidor, el qual ja està pre-imprès parcialment per reduir-ne l'espera per part de l'usuari. La variabilitat en temps de parada és reduïda també en relació als altres tipus de cabines.

Headway (H)

El *headway* entre vehicles, com ja s'ha explicat a l'apartat 2.3, és la suma de el temps de reacció més el temps de posicionament més el temps de servei.

$$H = R + M + S \quad [1]$$

Per tant, s'obtindrà sumant les distribucions de probabilitat de cadascuna d'aquestes variables obtingudes en els apartats anteriors. Com que hi ha tres tipus de temps de servei en funció del tipus de cabina, s'hauran d'obtenir tres distribucions pel *headway*: *headway* per cabines manuals (H_m), per cabines automàtiques (H_a) i per cabines de recollida (H_r).

Headway per cabina manual (H_m)

Si es realitza l'histograma corresponent a sumar les distribucions de R, M i S_m , es té el següent:

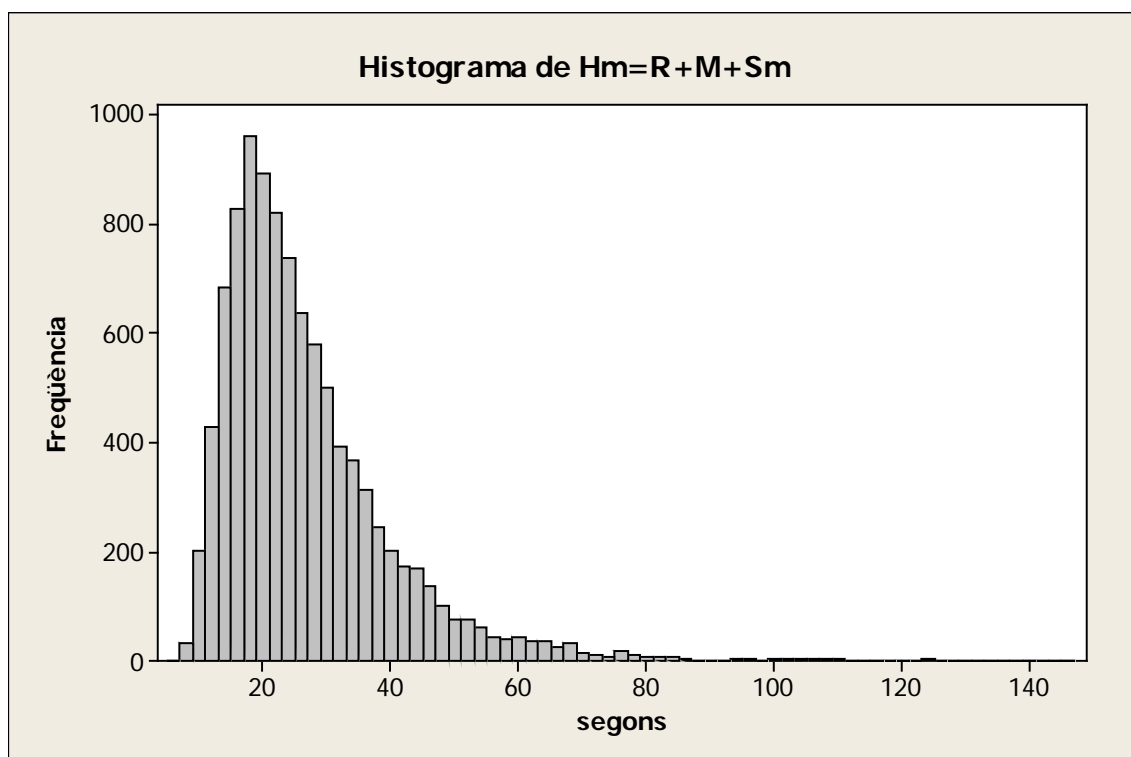


Figura 37: Histograma del *headway* per cabina de pagament manual.

on s'observa l'aspecte asimètric degut a les distribucions de les quals prové. Amb un valor mínim de 6,6 segons per als usuaris més ràpids, la qual cosa implica que estiguin atents a la cua per no perdre temps en la reacció, realitzin frenades i accelerades ràpides i efectuin un pagament d'uns 3 o 4 segons, cosa que faran els conductors més habituals, per exemple els *commuters*. A l'altre extrem s'observa casos esporàdics de més de un minut (inclús de dos minuts) corresponents als possibles incidents que hi pugui haver,

com no portar la targeta en correctes condicions, no portar efectiu suficient, etc. El valor mig i més raonable és $\mu = 26$ segons i la desviació típica és $\sigma = 13,2$ segons.

Com ja s'ha comentat a l'apartat 2.3, és necessari, per obtenir la capacitat d'un peatge en línia, calcular el valor de l'esperança matemàtica del màxim de les distribucions de probabilitat del *headway* de la primera i de la segona cabina, $E(\max[H_1, H_2])$.

$$C' = \frac{2}{E(H')} = \frac{2}{E(R) + E(\Delta M) + E(\max[H_1, H_2])} \quad [11]$$

per poder trobar el valor d'aquest paràmetre, és necessari calcular l'àrea compresa a sobre la corba de probabilitat acumulada (entre $t = 0$ i $t = \infty$) de la distribució resultant de calcular el producte de les probabilitats acumulades dels *headways* de la primera i la segona cabina. Considerant aquestes distribucions iguals entre elles i corresponents a la distribució que es mostra a la Figura 37, podem obtenir la figura següent, on es mostra la corba de probabilitat acumulada per al *headway* H_m (en color blau) i per al $\max[H_m, H_m]$ (en color verd).

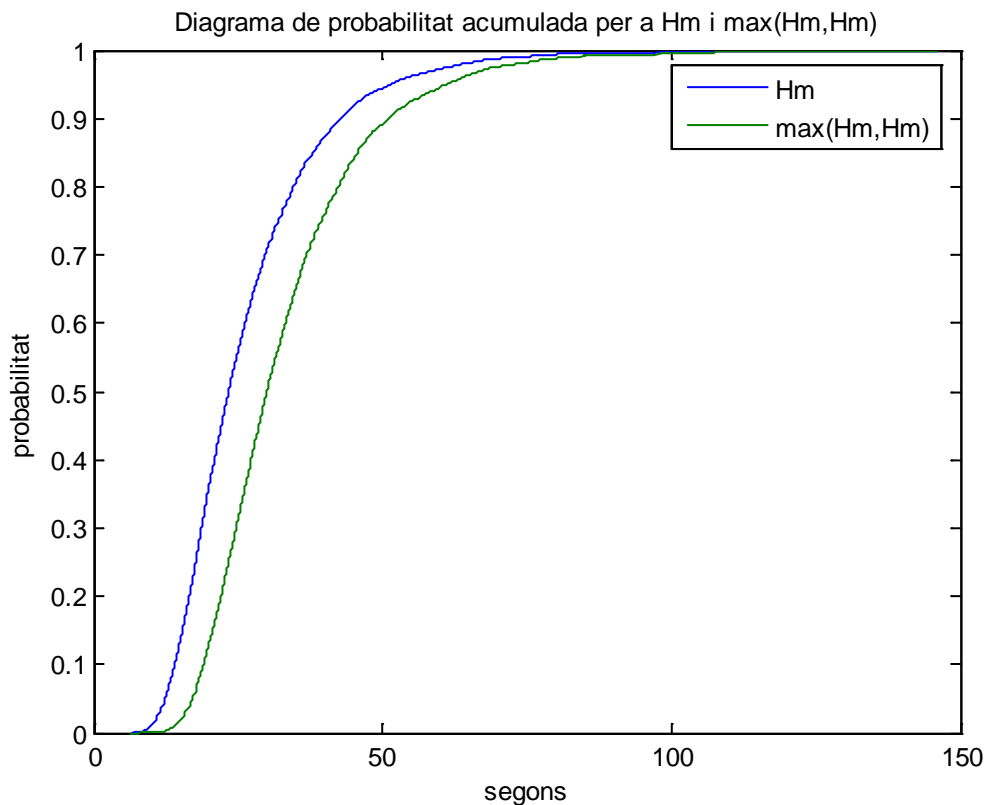


Figura 38: Diagrama de probabilitat acumulada pel *headway* i el màxim per cabina manual.

Calculant les àrees a sobre de les corbes, entre temps igual a zero i infinit, s'obtenen els valors de les esperances matemàtiques per a cada variable. El valor de $E(\max[H_m, H_m])$ sempre serà major que el de $E(H_m)$ per tal i com ha estat definit anteriorment:

$$E(H_m) = \mu = 26,1 \text{ segons}$$

$$E(\max[H_m, H_m]) = 33,3 \text{ segons}$$

Headway per cabina automàtica (H_a)

Si es realitza l'histograma corresponent a sumar les distribucions de R , M i S_a , es té el següent:

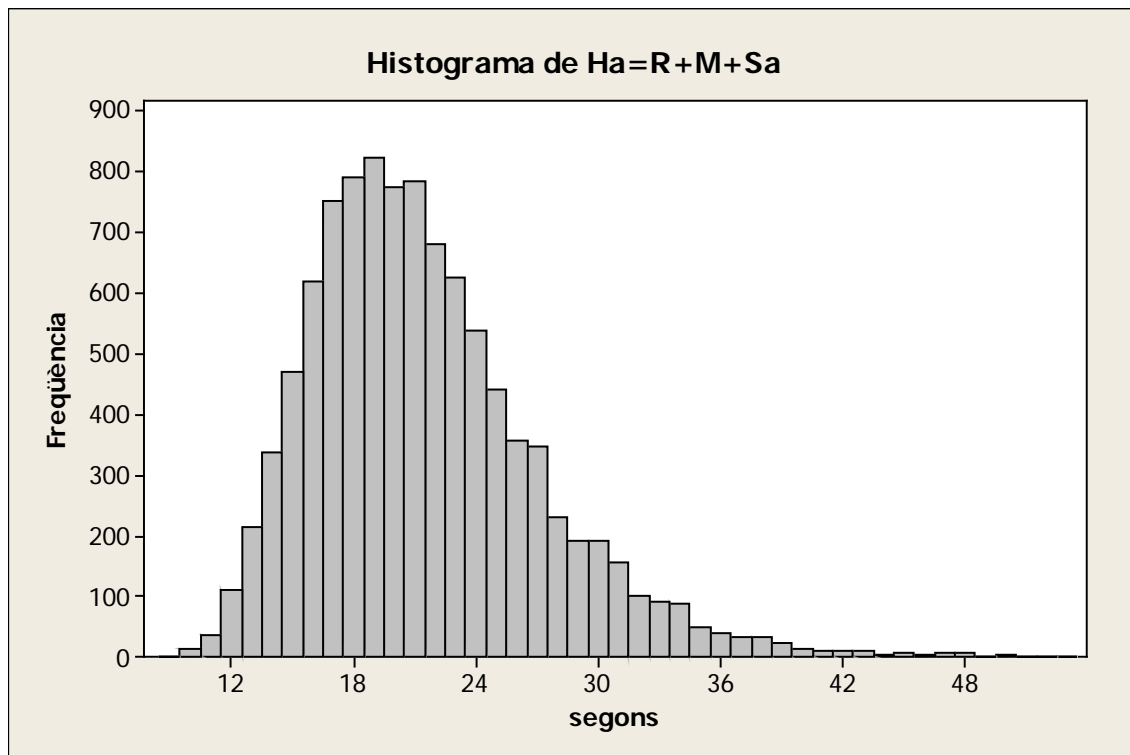


Figura 39: Histograma del *headway* per cabina de pagament automàtic.

on s'observa l'aspecte també asimètric. El seu valor mínim correspon a uns 10 segons pels usuaris més ràpids, habitualment els *commuters*. En comparació amb la cabina de pagament manual, l'automàtica presenta un límit inferior en el *headway* H (degut al temps de servei S , que és la única diferència entre els dos casos) una mica més gran, això s'entén en pensar que si es porta la taxa a pagar (ja sigui en efectiu o targeta) preparat, és més fàcil entregar-ho a un servidor manual, que introduir la targeta a un servidor automàtic. Tot i això, pel fet de intervenir-hi un operador manual, dependrà de la forma d'actuar d'aquest que el temps de servei sigui més o menys prolongat. A l'altre extrem s'observen casos esporàdics a prop del minut, corresponents als possibles incidents que hi pugui haver, com no portar la targeta en correctes condicions, que aquesta es caigui a terra, etc. El valor mig i més raonable és $\mu = 21$ segons.

Un aspecte important a tenir en compte, a part dels extrems de l'interval temporal, és que en les cabines automàtiques hi ha menys variabilitat en el *headway* que en les cabines manuals ($\sigma = 5,6$ segons), això és així degut a les característiques del temps de servei i té una implicació molt important en el resultat de la millora de capacitat (veure apartat 2.4)

Les funcions de probabilitat acumulada pel cas de la cabina automàtica, tant per H_a (línia color blau) com per $\max[H_a, H_a]$ (línia color verd) es mostren en el següent gràfic:

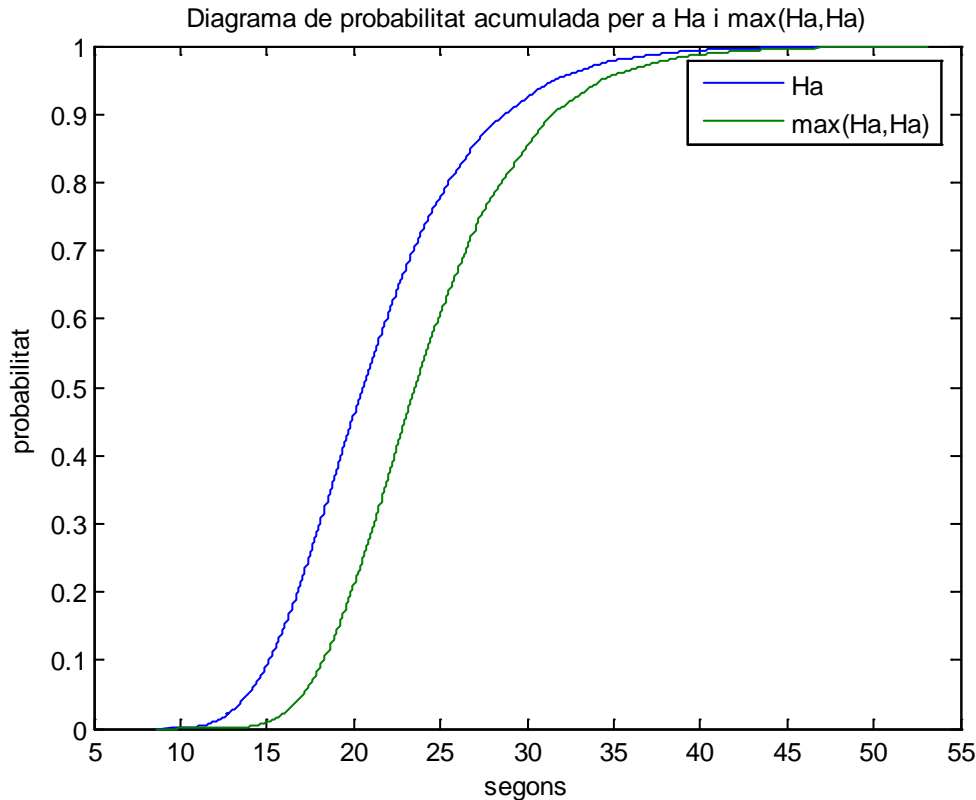


Figura 40: Diagrama de probabilitat acumulada pel headway i el màxim per cabina automàtica.

Si es troben els valors dels paràmetres $E(H_a)$ i $E(\max[H_a, H_a])$ com en el cas anterior, calculant l'àrea superior a les corbes entre zero i infinit, es té el següent:

$$E(H_a) = \mu = 21,4 \text{ segons}$$

$$E(\max[H_a, H_a]) = 24,4 \text{ segons}$$

Es pot apreciar que entre aquests dos valors hi ha una diferència d'un 14%, en canvi en el cas de la cabina manual es tenia una diferència d'un 25%. Això, que es degut a dispersió en els temps de servei, és de gran rellevància per l'anàlisi de capacitat de l'apartat 5.1.

Headway per cabina de recollida de tiquet (H_r)

Si representem la figura de l'histograma del cas de cabina de recollida de tiquet (veure Figura 41), s'observen valors que van des de sota de 6 segons fins a alguns casos esporàdics de 20 segons de durada amb una esperança matemàtica de $\mu = 10,5$ segons. L'aspecte també és asimètric, però aquesta característica es presenta en menor grau que en els dos tipus de cabines anteriors perquè la variabilitat en una cabina de recollida de tiquet és baixa ($\sigma = 1,7$ segons) i la probabilitat de que ocorrin problemes que allarguin el temps de forma especial és mínima gràcies al procés de recollida de tiquet, que és molt més senzill que les transaccions dels altres tipus de cabines.

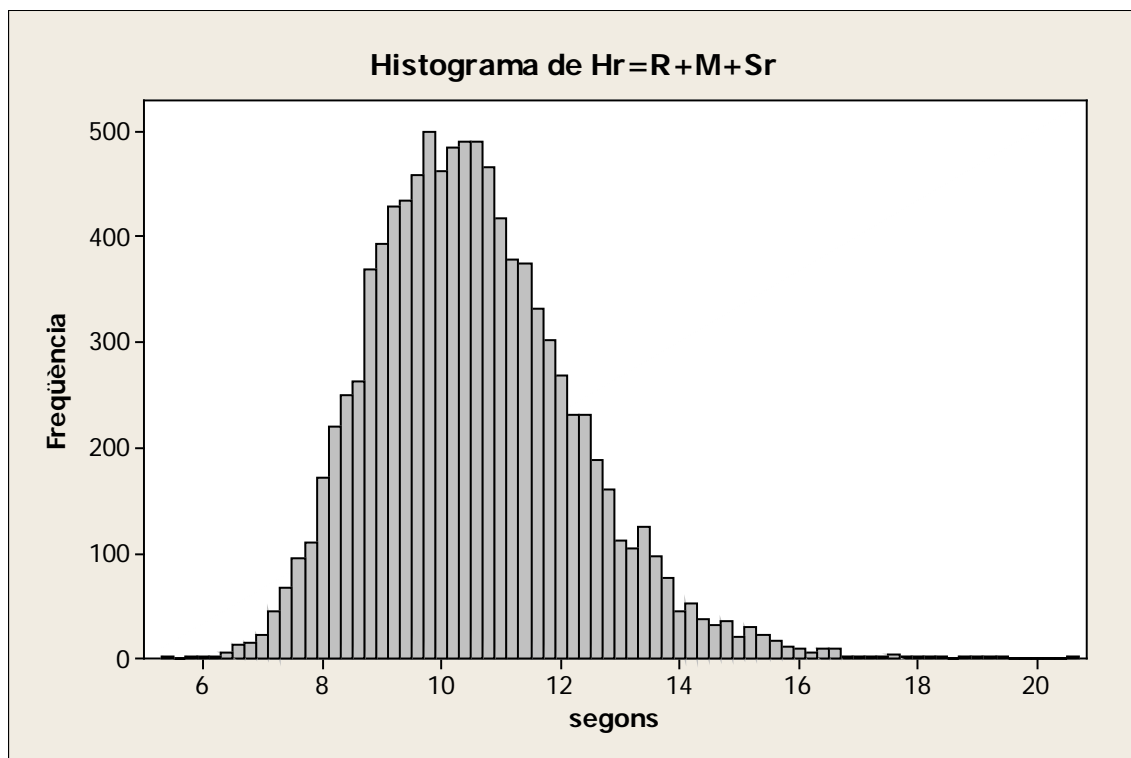


Figura 41: Histograma del *headway* per cabina de recollida de tiquet.

La representació de les corbes de probabilitat acumulada per a H_r i $\max(H_r, H_r)$ és aquesta:

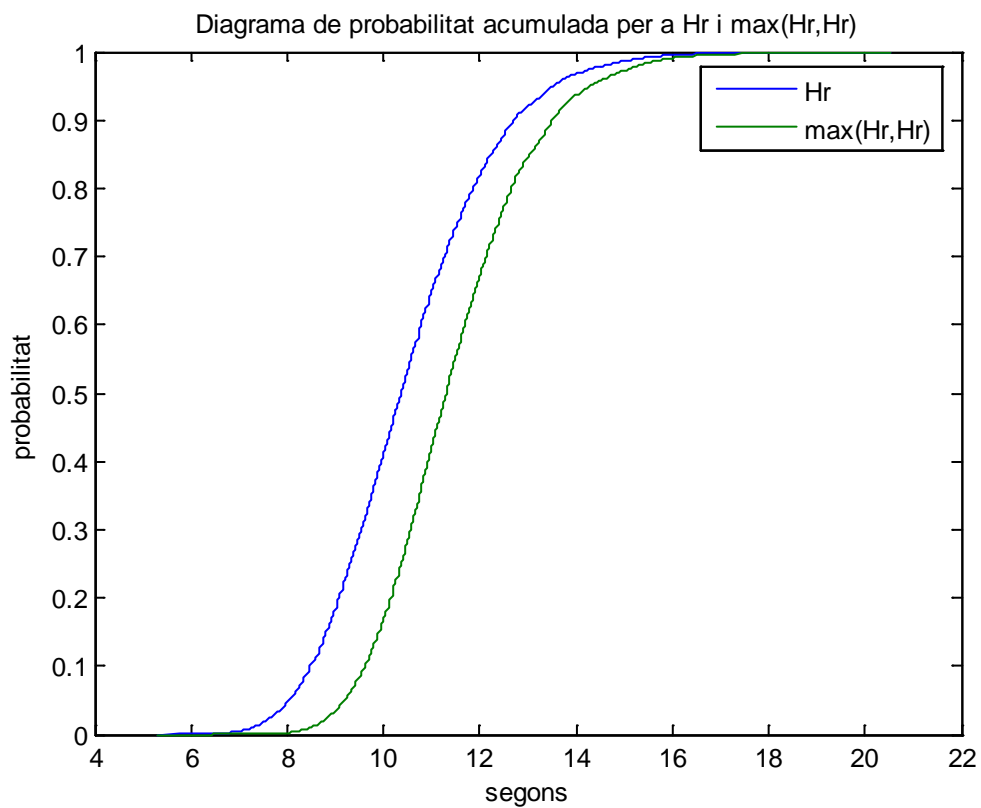


Figura 42: Diagrama de probabilitat acumulada pel *headway* i pel màxim. Cabina recollida tiquet.

I fent el mateix procediment que en els altres tipus de cabines, per aquestes corbes s'obtenen els valors següents:

$$E(H_r) = \mu = 10,5 \text{ segons}$$

$$E(\max[H_r, H_r]) = 11,5 \text{ segons}$$

Taxa d'arribades

Un altre variable important en tot sistema de cues és la taxa d'arribades (nombre de vehicles que arriben per interval de temps), o el seu invers, l'interval temporal entre arribades. Com més gran sigui aquesta variable més probable és el col·lapse del sistema per cua excessiva i permanent. Més concretament, si la taxa d'arribades supera la capacitat de servei del sistema, es produiran cues permanents. Pel contrari, si la taxa d'arribades és inferior a la capacitat, no es produiran cues permanents, tot i que es puguin produir cues de forma momentània, pel fet que tant el temps de servei com l'interval entre arribades són variables estocàstiques associades a certes distribucions de probabilitat amb les seves respectives dispersions.

Pel cas de l'AP-7, es disposa d'informació del nombre de vehicles que circulen per la via cada 3 minuts en diverses seccions. Els gràfics adjunts (Figura 43, Figura 44, Figura 45) mostren la quantitat de vehicles que han travessat el peatge de la Roca del Vallès en direcció nord-sud, considerant intervals de 3 minuts. Es mostren tres escenaris diferenciats quant al tipus de dia.

El primer correspon a un dia laborable (un dilluns) amb forta demanda de trànsit.

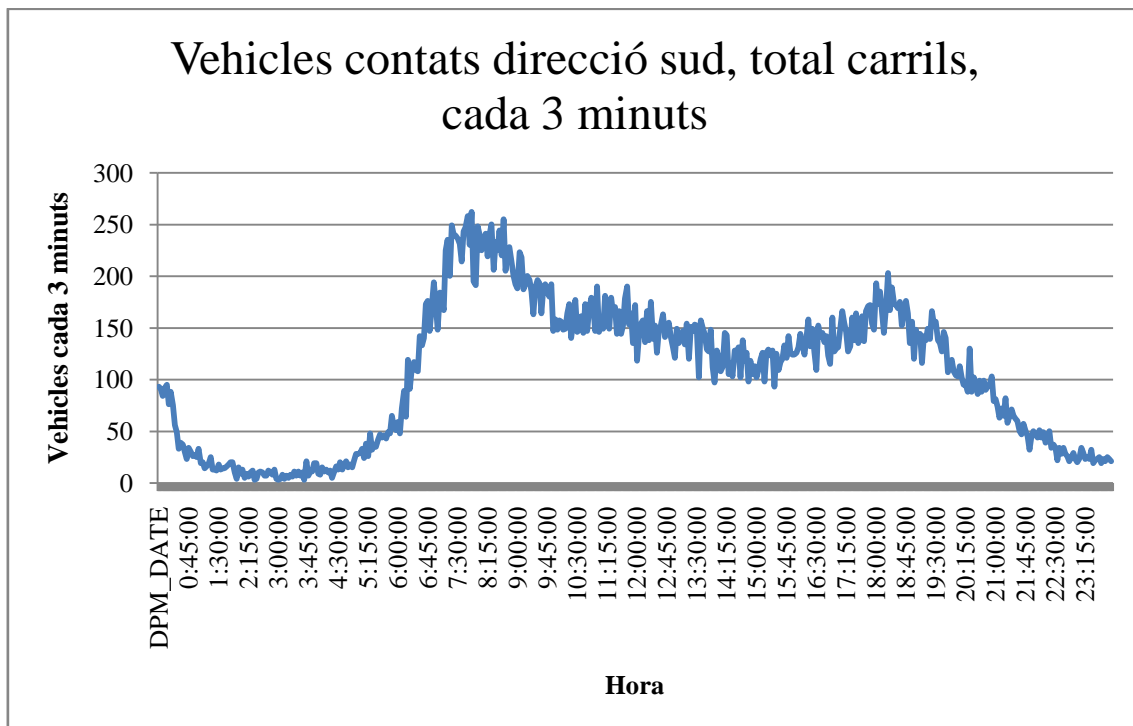


Figura 43: Vehicles comptats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, un dilluns amb forta demanda [Font: abertis].

Es pot apreciar la forma típica amb un pic a primera hora del matí (desplaçaments a les respectives feines) i un pic més lleuger i esglaonat al vespre (tornada de vehicles a les

respectives vivendes). Així doncs, els intervals amb major aflluència de vehicles corresponen al període d'hora punta del matí, entre les 7:30 i les 8:30. Aquí es tenen quantitats que superen lleugerament els 250 vehicles cada 3 minuts, amb la qual cosa es té un interval temporal entre arribades mínim de 0,72 segons.

La següent figura mostra l'evolució temporal del nombre de vehicles que circulen un diumenge a la tarda (tornada de cap de setmana) també de forta intensitat.

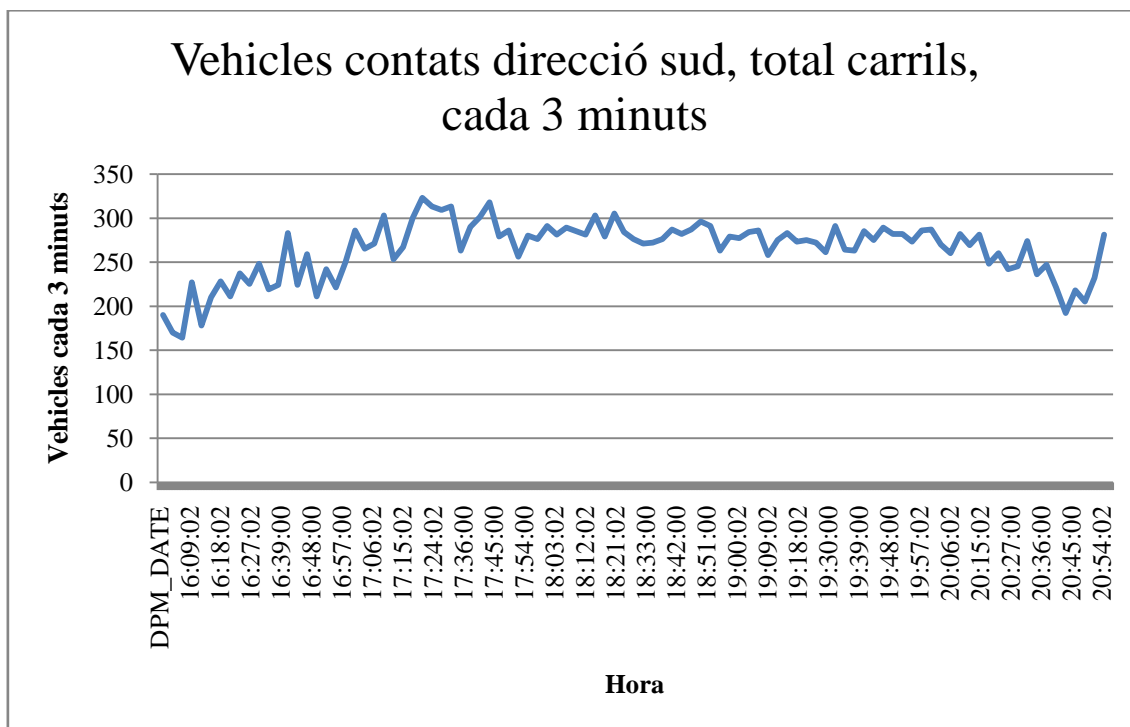


Figura 44: Vehicles comptats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, una operació tornada de cap de setmana [Font: abertis].

En aquesta situació, el flux de vehicles és més homogeni gràcies a l'esglaonament que efectuen els usuaris de l'autopista en la seva tornada del cap de setmana. Tot i així, s'arriba a valors de 300 vehicles cada 3 minuts, la qual cosa comporta un interval temporal mig entre vehicles de 0,6 segons. Aquesta taxa es pot arribar a perllongar en el temps una hora i mantenint-se un interval entre 0,6 i 0,7 segons fins a 3 hores al llarg de la tarda.

Per últim, un altre dia interessant a tenir en compte és una operació tornada de Setmana Santa (Figura 45).

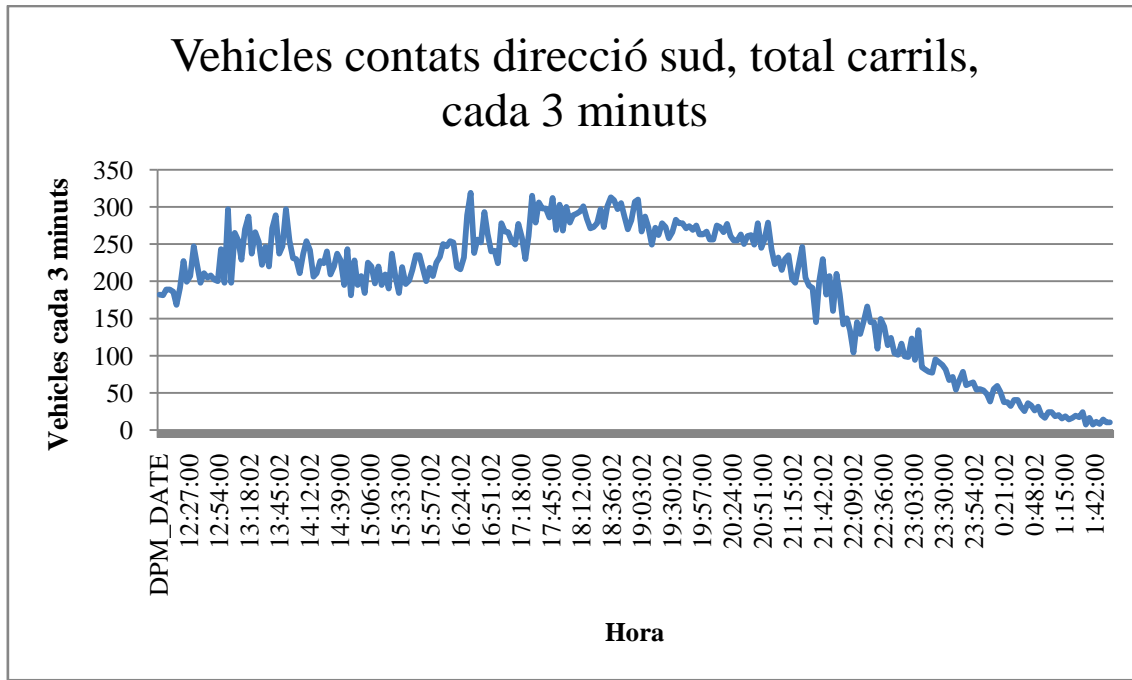


Figura 45: Vehicles contats en direcció sud en el tram de la Roca del Vallès, cada 3 minuts, una operació tornada de Setmana Santa [Font: abertis].

En aquest cas s'observa que s'arriben als mateixos màxims en el flux de vehicles, però més estesos al llarg del dia.

Així doncs, es tindrà en compte per l'estudi un interval temporal mínim entre vehicles de 0,6 segons, la qual cosa correspon a 6.000 vehicles per hora. Si es té en compte que en direcció nord-sud en aquest tram de l'autopista AP-7 existeixen 3 carrils, això suposa un flux de 2.000 vehicles/hora per carril, xifra lleugerament inferior a la capacitat màxima teòrica d'un carril d'autopista.

Si es té en compte únicament el flux corresponent a vehicles lleugers per l'estudi del peatge en línia (tal com s'indica a l'apartat 4.2, Percentatge de pesants), s'ha de dur a terme la següent formulació:

$$6000 \frac{veh}{h} \left\{ \begin{array}{l} 83\% \text{ veh. lleugers} \Rightarrow 4980 \frac{veh}{h} \Rightarrow 0,7 \text{ segons entre vehicle lleuger} \\ 17\% \text{ veh. pesants} \Rightarrow 1020 \frac{veh}{h} \Rightarrow 3,5 \text{ segons entre vehicle pesant} \end{array} \right\}$$

Amb la conclusió que l'interval temporal entre vehicles lleugers no supera (en les dades que es tenen en compte) la xifra de 0,7 segons. I per tant aquest serà el flux màxim de vehicles que arribarà al peatge per a l'estudi i simulacions.

4.2. Variables relatives a la composició del trànsit

A part de les variables relatives a la teoria de cues, és necessari conèixer la composició del conjunt d'usuaris ja sigui a nivell de vehicle lleuger i pesant, com a la proporció de demanda del tipus de cabina de pagament.

Percentatge de pesants

Com ja s'ha comentat anteriorment, la idea del peatge en sèrie només pot arribar a tenir sentit en el cas de vehicles lleugers (incloent motos), ja que els vehicles pesants, degut a la seva excessiva longitud, comporten un *layout* del peatge en línia del tot ineficient. I no només això, sinó que també, el fet que els temps de posicionament són més elevats en el cas de vehicles pesants comporta que la millora de capacitat que es podria obtenir amb el peatge en sèrie seria menor (veure apartat 2.4).

Així doncs, és necessari saber el percentatge de vehicles pesants i lleugers, per tal de tenir en compte únicament aquests últims a l'hora de dimensionar nombre de cabines per cada escenari. I afegir posteriorment el nombre de cabines necessàries per vehicles pesants, essent aquestes amb la disposició habitual d'una sola cabina per carril.

Pel cas del tram d'estudi (peatge de la Roca del Vallès) que correspon al tram entre Granollers i l'enllaç amb la C-60 es tenen els següents percentatges (Taula 2).

| Vehicles lleugers | Vehicles pesants |
|-------------------|------------------|
| 83% | 17% |

Taula 2: Percentatge de vehicles lleugers i pesants pel tram de la Roca del Vallès [Font: abertis].

Percentatge d'assignació a cada tipus de cabina

A l'hora de realitzar les simulacions del funcionament global del peatge i per tal d'obtenir resultats referents al *toll plaza* sencer i no només a un tipus de cabina de pagament en concret, s'ha de tenir en compte el percentatge de demanda o d'assignació de cada tipus de pagament, és a dir, la distribució relativa dels usuaris del peatge entre el pagament manual, el pagament automàtic i l'ús de Via-T.

Aquesta distribució depèn del dia de la setmana, ja que en dies laborables existeix més proporció de *commuters* els quals disposen del dispositiu VIA-T més habitualment que no pas un usuari de cap de setmana. A més, aquesta proporció està en constant evolució, tendint a una demanda del tipus VIA-T cada cop major.

Per al tram de l'AP-7 que s'estudia en aquesta tesina (el peatge de la Roca del Vallès) i considerant una proporció normal per un dia laborable, es té la distribució d'aquesta demanda que es mostra al quadre següent (Taula 3).

| Carril Via-T | Carril de pagament Automàtic | Carril de pagament Manual |
|--------------|------------------------------|---------------------------|
| 35% | 35% | 30% |

Taula 3: Percentatge de demanda de cada tipus de cabina de pagament.

Aquestes dades s'han obtingut del mateix treball de camps elaborat per a obtenir els temps de servei i s'han contrastat amb informació aportada per Abertis.

5. Aplicació a l'AP-7

En aquest apartat es tracten valors concrets de temps, fluxos de trànsit i costos amb la finalitat d'obtenir resultats, tant a nivell de capacitat de servei com a nivell econòmic, del sistema de peatge en sèrie en l'hipotètic cas que s'introduís a la xarxa d'autopistes espanyoles. Més concretament, les dades a les quals es fa referència corresponen a l'AP-7 de Catalunya i el peatge que s'ha estudiat és el de la Roca del Vallès.

L'objectiu és arribar a la conclusió de si es rendible o no instaurar el peatge en sèrie amb la finalitat d'aconseguir oferir un nivell de servei òptim a les autopistes des del punt de vista social, dins d'unes condicions econòmiques i tècniques que no perjudiquin de forma excessiva a l'empresa operadora de l'autopista.

Així doncs, aquest bloc s'ha estructurat en dues parts: la primera en la qual es fa referència als resultats corresponents al nivell de capacitat que pot oferir el peatge en sèrie (sempre comparant-lo amb les cabines de peatge habitual) i el segon bloc, a partir dels resultats anteriors, el que pretén és fer un anàlisi de viabilitat econòmica d'aquest nou sistema de peatges, no només des del punt de vista de l'empresa privada, sinó també des d'una perspectiva social en la qual el benefici per als usuaris és una millora en la qualitat del servei i una reducció en els temps de demora en cues, la qual cosa, si es té en compte el valor del temps (cada cop més important) es tradueix en uns beneficis econòmics per a la societat.

5.1. Anàlisi de capacitat

En aquest primer punt es tracten les variables del transit exposades l'apartat 4 i s'obtenen els resultats referents al nivell de capacitat i per tant a la qualitat de servei que pot oferir el sistema de peatge en línia en front al sistema de peatge habitual.

Per tal d'obtenir uns resultats numèrics coherents i propers a la realitat, s'ha procedit al seu càlcul a través de dues metodologies independents: la formulació teòrica analítica desenvolupada a l'apartat 2.3 i la simulació a través del software creat per aquesta tesina i explicat a l'apartat 3.

Com es pot veure més endavant, els dos procediments han convergit de manera satisfactòria en uns mateixos resultats, amb la qual cosa es pot estar molt segur de la seva fiabilitat.

D'altra banda, també s'han realitzat els mateixos càlculs amb l'expressió simplificada (equació [34] de l'apartat 2.4, Expressió general) després de la formulació analítica, per tal de veure'n el grau de fiabilitat per poder-la usar en altres escenaris que es vulguin estudiar.

Augment de capacitat segons el tipus de cabina

S'exposa a continuació les millores de capacitat que ofereix el peatge en sèrie en front al peatge habitual en funció del tipus de cabina de pagament, ja sigui cabina manual,

automàtica o de recollida de tiquet (que són les tres tipologies de les quals s'han pres dades per aquest estudi).

Els resultats s'estructuren tenint en compte la variable de mal ús, φ (comentada a l'apartat 1.3, Debilitats), la qual permet fixar dues situacions en funció del grau d'implantació del peatge en línia i, per tant, del grau de coneixement de la societat sobre aquest. Així doncs, es troben dues etapes: la inicial i la de maduresa. Dins de la situació de maduresa es contemplen tres escenaris: optimista, intermig i pessimista.

La situació inicial correspon als primer mesos d'implantació del peatge en sèrie. Durant aquests, els usuaris del peatge es trobaran amb una metodologia a seguir a la qual no estan acostumats. L'ús correcte del peatge implica una modificació dels hàbits dels usuaris a l'hora d'utilitzar el peatge i, conseqüentment, requereix un cert temps per ésser adaptat amb relativa bondat. Així doncs, es considera un factor de mal ús $\varphi = 0,5$ la qual cosa implica que la meitat dels usuaris no faran un ús correcte del peatge en sèrie transformant-lo en un peatge habitual d'una sola cabina per carril.

La situació de maduresa correspon als anys posteriors al període inicial, el qual pot durar un any aproximadament. La rapidesa amb la que s'arribi a aquesta situació depèn, entre d'altres factors, de la difusió i propaganda que es faci del funcionament del peatge en línia. Dins d'aquesta etapa es presenten tres escenaris també en funció del coeficient de mal ús: l'optimista, l'intermig i el pessimista.

Els factors decisius a l'hora de trobar-se en un escenari o un altre són, com ja s'ha comentat, la difusió que s'hagi fet del peatge en línia i, per tant, del grau d'internalització que en tinguin els usuaris. Però també la franja horària i el dia de la setmana, ja que en dies laborables i en hores puntes el percentatge de *commuters* dins del parc d'usuaris és elevat i aquest perfil d'usuari serà el primer en adaptar-se i a utilitzar correctament el peatge en línia. Tot i això, es considera que sempre hi haurà un límit inferior de percentatge de mal ús que costarà molt fer desaparèixer, causat per conductors gens habituals, estrangers a les autopistes catalanes, etc. Aquest es pot considerar d'un 5%.

Per tant, l'escenari optimista pot correspondre a un dia laborable en hora punta (que és quan més es necessita un augment de capacitat de servei) i l'escenari pessimista, per la seva banda, es pot associar a un dia festiu on els conductors no són usuaris habituals i, per tant, no tenen un grau tant elevat de coneixement del peatge en línia com els *commuters*.

Així doncs, gràcies al coeficient de mal ús es poden estructurar les següents etapes i escenaris de les quals se n'obtindran els resultats de millora de capacitat del peatge tàndem en front a l'habitual. Queda resumit en la següent Taula 4:

| Etapa inicial | Etapa de maduresa | | |
|--|--|-------------------------|--|
| | Escenari pessimista | Escenari intermig | Escenari optimista |
| Període d'implantació del peatge en sèrie (aproximadament d'un any). | Dies festius amb conductors no habituals i/o estrangers. | Situacions intermitges. | Hora punta d'un dia laborable amb un alt percentatge de <i>commuters</i> . |
| $\varphi = 0,5$ | $\varphi = 0,3$ | $\varphi = 0,15$ | $\varphi = 0,05$ |

Taula 4: Factor de mal ús en funció de l'etapa d'implantació i de l'escenari.

Per tant es pot crear una taula de resultats en funció de l'etapa i escenari per cada tipus de cabina de pagament: cabina manual (targeta i/o efectiu), cabina automàtica (targeta) i cabina de recollida de tiquet. Com ja s'ha comentat, aquestes cabines de pagament corresponen a un peatge tancat, com ho és el peatge de la Roca del Vallès, les quals tenen uns temps de servei lleugerament superiors als del peatge obert.

Es mostren doncs, per cada tipus de cabina, dues taules. En la primera d'elles, apareixen les dades necessàries pel càlcul de l'augment de capacitat de forma analítica i els resultats obtinguts mitjançant tres vies: l'expressió analítica [12] de l'apartat 2.3, l'expressió simplificada [34] de l'apartat 2.4 que suposa una aproximació de l'anterior i el resultat obtingut via simulació amb el software desenvolupat per a la tesina i que s'explica a l'apartat 3. Es pot apreciar que la diferència entre els tres resultats no és important, cosa que indica la fiabilitat dels tres mètodes. En aquesta taula, els resultats corresponen a un factor de mal ús igual a zero.

En la segona taula, hi figura l'etapa, l'escenari, el factor de mal ús corresponent i la millora de capacitat que ofereix el peatge en sèrie amb dues cabines per carril en front al peatge amb una sola cabina per carril.

Cabina de pagament manual (peatge tancat)

| $E(H) = \mu$ | $E(\max[H_1, H_2])$ | σ/μ | $E(S)$ | $\Delta C(\%)$ analític ⁽¹⁾ | $\Delta C(\%)$ aprox. ⁽²⁾ | $\Delta C(\%)$ simulació ⁽³⁾ |
|--------------|---------------------|--------------|----------|---|---|--|
| 26,1 seg | 33,3 seg | 0,5 | 20,1 seg | 41% | 42% | 41% |

Taula 5: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per pagament manual.

⁽¹⁾ Es té en compte l'expressió analítica [12].

⁽²⁾ Es té en compte l'expressió simplificada i aproximada [34].

⁽³⁾ Es té en compte el software de simulació explicat a l'apartat 3.

| Etapa inicial | Etapa de maduresa | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Escenari pessimista | Escenari intermig | Escenari optimista |
| $\varphi = 0,5$ | $\varphi = 0,3$ | $\varphi = 0,15$ | $\varphi = 0,05$ |
| $\Delta C(\%) = 21\%$ | $\Delta C(\%) = 29\%$ | $\Delta C(\%) = 35\%$ | $\Delta C(\%) = 39\%$ |

Taula 6: Millora de capacitat per pagament manual en funció de l'etapa i l'escenari.

Cabina de pagament automàtic (peatge tancat)

| $E(H) = \mu$ | $E(\max[H_1, H_2])$ | σ/μ | $E(S)$ | $\Delta C(\%)$ analític ⁽¹⁾ | $\Delta C(\%)$ aprox. ⁽²⁾ | $\Delta C(\%)$ simulació ⁽³⁾ |
|--------------|---------------------|--------------|----------|---|---|--|
| 21,4 seg | 24,4 seg | 0,26 | 15,3 seg | 52% | 49% | 52% |

Taula 7: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per pagament automàtic.

⁽¹⁾ Es té en compte l'expressió analítica [12].

⁽²⁾ Es té en compte l'expressió simplificada i aproximada [34].

⁽³⁾ Es té en compte el software de simulació explicat a l'apartat 3.

| Etapa inicial | Etapa de maduresa | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Escenari pessimista | Escenari intermig | Escenari optimista |
| $\varphi = 0,5$ | $\varphi = 0,3$ | $\varphi = 0,15$ | $\varphi = 0,05$ |
| $\Delta C(\%) = 26\%$ | $\Delta C(\%) = 36\%$ | $\Delta C(\%) = 44\%$ | $\Delta C(\%) = 49\%$ |

Taula 8: Millora de capacitat per pagament automàtic en funció de l'etapa i l'escenari.

Cabina de recollida de tiquet (peatge tancat)

| $E(H) = \mu$ | $E(\max[H_1, H_2])$ | σ/μ | $E(S)$ | $\Delta C(\%)$ analític ⁽¹⁾ | $\Delta C(\%)$ aprox. ⁽²⁾ | $\Delta C(\%)$ simulació ⁽³⁾ |
|--------------|---------------------|--------------|---------|---|---|--|
| 10,5 seg | 11,5 seg | 0,16 | 4,5 seg | 38% | 36% | 38% |

Taula 9: Millora de capacitat d'un carril tàndem respecte un carril habitual per recollida de tiquet.

⁽¹⁾ Es té en compte l'expressió analítica [12].

⁽²⁾ Es té en compte l'expressió simplificada i aproximada [34].

⁽³⁾ Es té en compte el software de simulació explicat a l'apartat 3.

| Etapla inicial | Etapla de maduresa | | |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Escenari pessimista | Escenari intermig | Escenari optimista |
| $\varphi = 0,5$ | $\varphi = 0,3$ | $\varphi = 0,15$ | $\varphi = 0,05$ |
| $\Delta C(\%) = 19\%$ | $\Delta C(\%) = 27\%$ | $\Delta C(\%) = 32\%$ | $\Delta C(\%) = 36\%$ |

Taula 10: Millora de capacitat per recollida de tiquet en funció de l'etapa i l'escenari.

Conclusions

Com es pot apreciar els resultats obtinguts de forma analítica i els obtinguts a través de simulació coincideixen satisfactòriament. Per altre banda, l'expressió simplificada [34] que s'ha obtingut per a l'augment de capacitat aporta uns resultats pròxims als reals, amb un petit marge d'error degut a les hipòtesis de simplificació, però permet fer aproximacions inicials per al sistema que es vulgui a través únicament d'introduir unes poques dades i així tenir un ordre de magnitud de la viabilitat del sistema tàndem per al cas concret. D'altra banda, és bo comprovar com l'error comès sempre queda del costat pessimista, és a dir, l'aproximació dona valors d'augment de capacitat inferiors als reals, això evita que posteriorment, a l'hora d'implantar el sistema, es tinguin resultats pitjors als esperats.

Fent referència als resultats per cada tipus de cabina es comprova com el tipus de pagament que més beneficiat surt de la idea de peatge en sèrie és l'automàtic, seguit del manual i, per últim, la recollida de tiquet. Això és així degut a que les cabines de pagament manual tenen un alt coeficient de dispersió σ/μ , cosa que comporta un mal resultat en comparació amb les automàtiques (veure apartat 2.4). La que s'emporta la pitjor part és la de recollida de tiquet a causa de tenir un temps de servei molt curt, la qual cosa va en detriment de l'augment de capacitat en un peatge tàndem com també s'ha demostrat a l'apartat 2.4.

Així doncs, s'arriba a la conclusió que en un període inicial aproximadament d'un any, les cabines manuals oferiran un augment de capacitat per carril respecte les habituals d'un 21%, les automàtiques un 26% i les de recollida de tiquet un 19%.

Els anys posteriors a la implantació del sistema de peatge en sèrie es tindrien uns valors que variarien entre un 36% i un 49% en el millor cas, que és el de les cabines de pagament automàtic. En segon lloc es troben els servidors de pagament manual que oferirien uns valors de millora per carril compresos entre un 29% i un 39%. Per últim, la que pitjor es comportaria (dels tipus de cabina estudiats) seria la de recollida de tiquet aportant millores de capacitat dins de l'interval de 27% i 36%.

Amb aquests resultats es desprèn la conclusió que el tipus de cabina més adequat per a l'implantació del sistema de peatges en sèrie és la de pagament automàtic, podent ésser aplicat també als servidors manuals i/o de recollida de tiquet amb pitjor resultat però amb cert potencial.

Dimensionament d'un toll plaza amb peatges en línia

En aquest apartat, amb la finalitat de tenir un ordre de magnitud del poder del sistema de peatges en sèrie, es realitza una simulació del dimensionament d'un peatge concret amb aquesta tipologia de carrils per tal d'acceptar un cert flux d'arribades amb un nivell de servei imposat. Això es farà a través del software informàtic desenvolupat a l'apartat 3.

Més concretament es treballarà sota les hipòtesis de diversos fluxos d'arribades de diversa intensitat durant una hora i amb una restricció en quan a nivell de servei de no permetre cues superiors a cinc vehicles en cap dels carrils, per així mantenir un nivell de qualitat alt. La proporció de demanda en funció del tipus de cabina de pagament és la establerta en l'apartat 4.2 (35% ViaT – 35% automàtic – 30% manual).

També es pren com a variable el coeficient de mal ús, del qual es donaran els valors de 1 (per simular els peatges actuals d'una cabina per carril), de 0 (per simular el peatge en sèrie de forma ideal) i un valor intermig de 0,2 (valor més real de com funcionarà el peatge en sèrie).

Els resultats que s'obtenen són el nombre de cabines de tipus manual i el nombre de cabines de tipus automàtic que fan falta per a cada situació. El nombre de cabines ViaT no es representa per no tenir implicació en el cas de peatge en sèrie, així com tampoc es consideren els vehicles pesants, per tant, el flux d'arribada que es suposa, sempre està minorat per dos factors: un que consideri únicament els vehicles que utilitzaran cabines de pagament automàtic o manual i l'altre que consideri únicament el nombre de vehicle lleugers que circulen.

Els fluxos a considerar (ja afectats pel percentatge de pesants i pel percentatge de demanda del ViaT) són els equivalents als intervals temporals entre vehicles de: 0,6 segons, 0,7 segons i 1 segon. L'últim correspon a una situació habitual al peatge de l'AP7 en la que el flux no és excessiu. El segon correspon al cas de màxim flux que s'ha obtingut a través de les dades de les que es disposen (apartat 4.1). I el primer correspon a una situació més pessimista en la que no hi hagués percentatge de pesants i, per tant, tot el flux fos de vehicles lleugers i haguessin de ser atesos tots ells per peatges en sèrie.

| Cabina | Arribades cada 0,6 seg. | | Arribades cada 0,7 seg. | | Arribades cada 1 seg. | |
|---------------------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|-----------------------|--------|
| | Autom. | Manual | Autom. | Manual | Autom. | Manual |
| Habitual $\varphi = 1$ | 13 | 13 | 11 | 12 | 8 | 9 |
| Tàndem $\varphi = 0,2$ | 9 | 10 | 8 | 9 | 6 | 6 |
| Tàndem $\varphi = 0$ | 9 | 10 | 8 | 8 | 5 | 6 |

Taula 11: Dimensionament del nombre de cabines de pagament manual i automàtic d'un peatge en funció del flux d'arribada i del factor de mal ús.

Això únicament representa unes situacions concretes i, per tant, podria ésser interessant obtenir el dimensionament en altres casos. Això es pot aconseguir de manera senzilla a través del software, però en aquest apartat només s'han tingut en compte aquestes situacions representatives amb la finalitat de donar una idea de l'ordre de magnitud general.

Com a resultat es pot veure que per tal de no tenir cues superiors a cinc vehicles en cap dels carrils, admetent un flux de vehicles cada 0,6 segons durant una hora, amb els peatges existents actualment són necessàries 13 cabines de pagament automàtic i 13

cabines de pagament manual (les cabines de tipus ViaT no es consideren). En canvi, si s'apliqués la tipologia de peatge en línia podria arribar a reduir aquest dimensionament a 9 carrils de servidor automàtic i 10 carrils de cabines manuals. Lògicament, cadascun d'aquests carrils consisteix en dos servidors o cabines en tàndem. Això suposa un estalvi d'entre un 23% i un 30% en el nombre de carrils i, per tant, en l'ample ocupat per la plataforma de peatge. Pels altres fluxos d'arribades s'obtenen resultats similars.

Entre un factor de mal ús de 0 i un de 0,2 no hi ha diferència en el nombre de cabines en molts casos ja que el nombre de cabines és una variable discreta i no continua. Així les 9 cabines que serveixen per un flux de vehicles cada 0,6 segons tant en el cas d'un mal ús nul o d'un mal ús del 20%, estaran més saturades en l'últim cas que en el cas en que tots els vehicles actuïn correctament.

5.2. Anàlisi econòmic

Per tal d'extreure conclusions sobre la viabilitat de la implantació del peatge en línia, no només és necessari saber la millora de capacitat que ofereix aquest, sinó també tenir una idea del cost que suposa la seva materialització en front a la del peatge habitual amb una cabina per carril. Així, es podran tractar les dues solucions des d'un punt de vista més global i se'n podran obtenir uns coeficients de millora de capacitat per cost, els quals permetran seleccionar, per a cada situació, la solució més viable. No es realitza un anàlisi en valor absolut, és a dir, no s'estudia si els beneficis que s'obtenen en afegir carrils al peatge compensen les despeses que això suposa, sinó que es realitza una comparativa relativa entre tres alternatives independents, les quals tenen la finalitat d'augmentar la capacitat del peatge. Aquestes alternatives són: crear nous carrils de la tipologia habitual o single (una cabina per carril), crear nous carrils tipus tàndem (dues cabines per carril) o adaptar els carrils existents a carrils tàndem.

A l'annex B s'han especificat els costos que suposa la construcció d'un peatge habitual (amb una cabina per carril) gràcies a informació aportada per abertis (Cetres Enginyers, 2002). Aquests s'han desglossat en costos fixos i costos variables (en funció del nombre de carrils que es vulguin construir). Per obtenir els costos equivalents a les altres alternatives, s'han aplicat uns coeficients basats en una sèrie d'hipòtesis.

A la Figura 46 es representen les expressions dels costos d'ampliar un peatge a través de les tres alternatives independents. Per a cada cas es representa de forma gràfica en funció del nombre de carrils, N , que intervinguin.

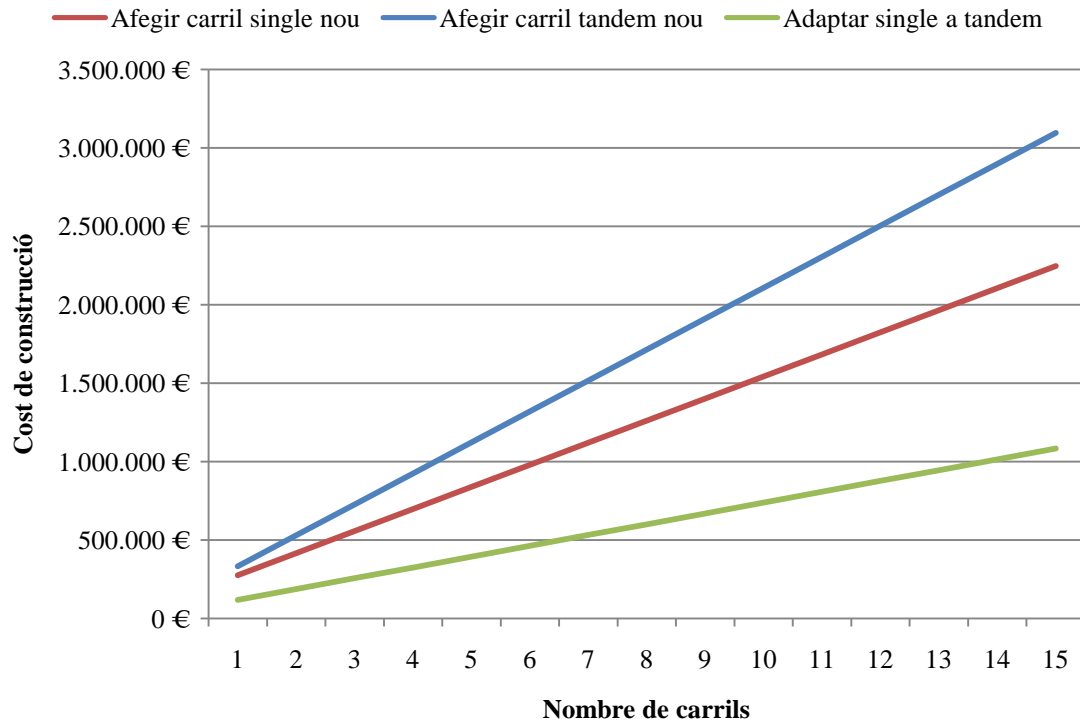


Figura 46: Cost de construcció de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils.

$$\text{Cost} = 136.000 + 140.700 \cdot N \quad [37]$$

$$\text{Cost} = 136.000 + 197.325 \cdot N \quad [38]$$

$$\text{Cost} = 50.000 + 68.869 \cdot N \quad [39]$$

S'aprecia com és més car realitzar carrils tàndem que carrils normals, degut a que els *toll booth* són més llargs i, òbviament, té el doble de cabines de pagament. Aquesta diferència de cost és deguda únicament al cost variable, ja que se suposa que el cost fix serà el mateix. A més, també es pot veure que el que resulta més barat és adaptar els carrils ja existents a carrils tàndem, tot i que no té perquè ser l'opció més viable com es veu més endavant.

D'altra banda, a partir dels resultats relatius a la capacitat obtinguts a l'apartat 5.1 es pot realitzar un gràfic equivalent a la Figura 46, però en termes de millora de capacitat (veure annex B). Amb això s'obté el concepte de benefici que suposa cada alternativa que, conjuntament amb els costos, aportarà un criteri per a valorar la seva viabilitat en funció del nombre de carrils.

Així doncs, es crea un rati de millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives i per a cada tipus de cabina de pagament. S'obtenen les següent figures: Figura 47, Figura 48 i Figura 49.

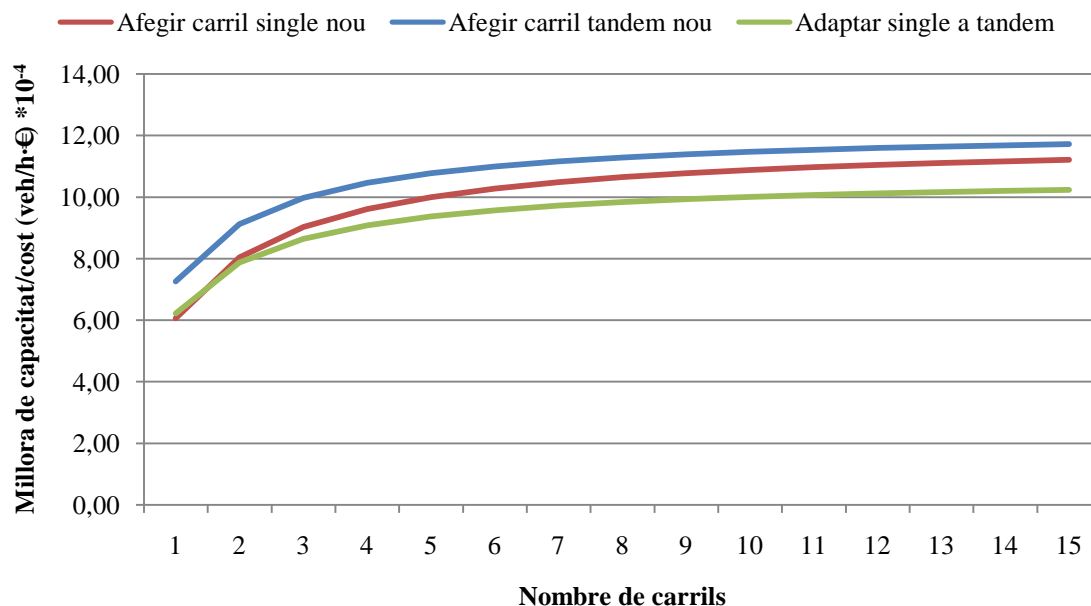
Cabina de pagament automàtic

Figura 47: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per pagament automàtic.

En aquest tipus de cabina, gràcies a que és la que aporta un major percentatge de millora de capacitat del tàndem respecte a les cabines habituals (apartat 5.1), es pot veure com sigui quin sigui el nombre de carrils que es vulgui crear, és més aconsellable fer-los tàndem que fer-los amb una sola cabina per carril. Aquesta preferència perd força quan el nombre de carrils és molt elevat, ja que en el límit ($N \rightarrow \infty$), les dues corbes tendeixen a coincidir.

D'altra banda també es pot apreciar que l'alternativa d'adaptar els carrils existents a la tipologia tàndem, tot i ser la més barata, presenta un pitjor rati resultant així desaconsellable per aquests tipus de cabines. Tot i això, per a una ampliació d'un poc nombre de carrils (un o dos) és més aconsellable adaptar els existents a tàndem, que no pas afegir-ne de nous del tipus single (una cabina per carril). Això és degut als costos fixos.

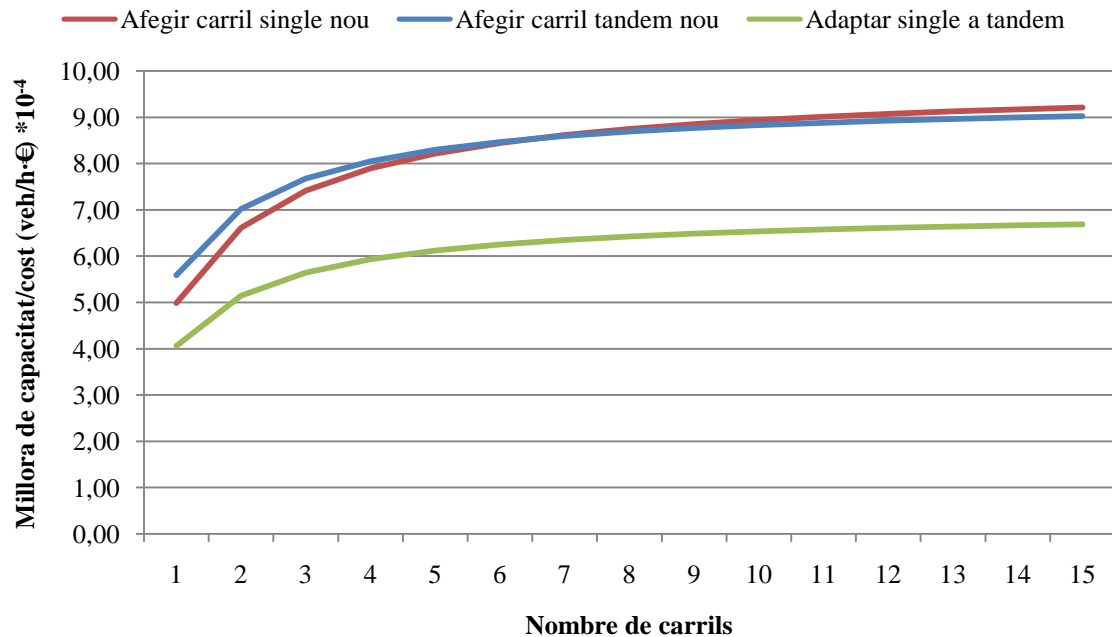
Cabina de pagament manual

Figura 48: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per pagament manual.

En aquest tipus de cabina, la de pagament manual, es veu clarament com l'alternativa d'adaptar els carrils existents a carrils tàndem resulta inapropiada per a qualsevol magnitud de carrils.

A diferència del cas anterior, aquí la decisió d'afegir nous carrils single o tàndem depèn del nombre de carrils que es vulguin crear. Així, tenim que per ampliacions de peatge menors a sis carrils, és més aconsellable que aquests siguin del tipus tàndem, ja que tenen un major rati millora de capacitat per cost. En canvi, per a una ampliació superior a 6 carrils, resulta més viable crear carrils dels habituals. Això és culpa dels majors costos variables que presenten els carrils tàndem en front als single i del fet que la cabina de pagament manual no aporta un gran augment de capacitat amb el sistema de peatges en línia (apartat 5.1).

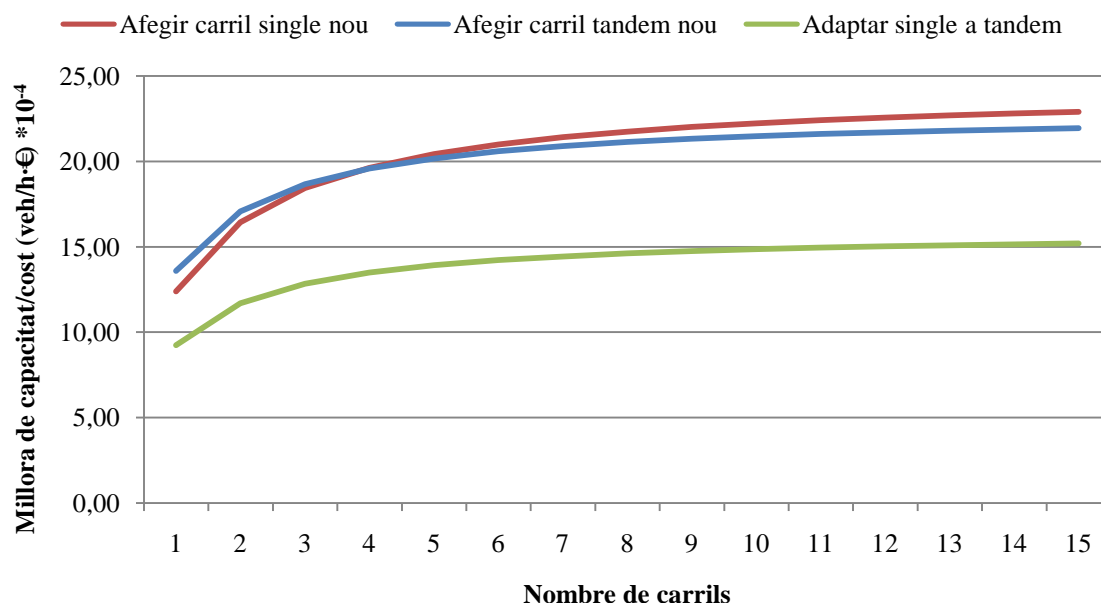
Cabina de recollida de tiquet

Figura 49: Rati millora de capacitat per cost de cadascuna de les alternatives en funció del nombre de carrils per recollida de tiquet.

En aquest últim tipus de cabina es produeix la mateixa situació que en el cas de les cabines de pagament manual, però amb la diferència que aquí el nombre de carrils a partir del qual deixa de ser interessant la idea del tàndem és de quatre. Això és culpa que en aquest tipus de cabines, les de recollida de tiquet, la millora de capacitat del peatge en línia és encara pitjor que en les cabines de pagament manual.

Conclusions

La primera conclusió que es desprèn de l'anàlisi econòmic es que l'alternativa d'adaptar carrils existents per tenir carrils tàndem, tot i ser la més barata, resulta la menys viable ja que el rati millora de capacitat vs cost és inferior al de les altres alternatives consistents en crear nous carrils de peatge i per tant augmentar la mida del *toll plaza*. Tot i això, hi ha situacions en les que no és possible fer aquest augment en amplada de la plataforma de peatge per culpa de barreres naturals i/o artificials, amb la qual cosa és obligat recórrer a la solució de modificar els carrils existents per tal de crear-ne del tipus tàndem; el resultat no serà òptim, però les condicions obliguen a optar-hi.

Així doncs, deixant de banda la última observació, la idea de peatge en sèrie queda únicament raonada en el cas de la creació de nous carrils, ja sigui per la creació de nous peatges des de zero o per l'ampliació de peatges existents afegint-hi nous carrils.

En el cas de les cabines de pagament automàtic, gràcies al seu alt percentatge de millora de capacitat en utilitzar-les com peatge en línia, el més viable és que si s'han de crear nous carrils, aquests siguin de la tipologia tàndem i no de les habituals independentment

del nombre de carrils que es vulguin crear. Així doncs, queda recomanat que per la creació de nous peatges, en el cas de les cabines de pagament automàtic, aquestes estiguin agrupades formant carrils tàndem.

Per últim, en el cas de les cabines de pagament manual i les de recollida de tiquet, per tenir unes millores de capacitat menors que les cabines de pagament automàtic, resulten només adequades per a les ampliacions de peatges en les que s'hagin de crear pocs carrils (menys de sis i menys de quatre respectivament). Per a la creació d'un nou *toll plaza* des de zero, suposant que aquest tindrà més nombre de cabines que els límits esmentats, queda desaconsellada la idea de peatge en sèrie per aquestes tipologies de pagament, a no ser que per motius orogràfics sigui aconsellable o obligatori utilitzar el mínim espai possible.

6. Conclusions i recerca futura

Conclusions generals

El sistema de peatge en sèrie aporta tot el seu potencial en situació de cua permanent o saturació, és a dir, quan els carrils presenten cues d'espera de vehicles, aquesta ha estat una hipòtesi de partida per tot el desenvolupament teòric.

El concepte de peatge en línia no té sentit quan es parla de carrils ViaT o TeleTac, ja que els vehicles no paren per efectuar el servei i, per tant, no existeix cabina o servidor de forma física.

Tampoc és aplicable a vehicles pesants, ja que aquests, a causa de la seva longitud excessiva, bloquegen els dos servidors del tàndem, inutilitzant el concepte de peatge en línia.

L'augment de capacitat que ofereix un carril tàndem en front un carril habitual de peatge depèn del temps de servei, del grau de dispersió o variabilitat del *headway* i del factor de mal ús, el qual representa la quantitat de vehicles que utilitzen correctament el peatge en sèrie.

Es pot demostrar analíticament que com més gran és el temps de servei que requereix un procés (ja sigui el pagament al peatge o un altre vinculat a un sistema de cues), millor comportament tindrà aquest si s'adopta la tipologia de servidor en sèrie, ja que oferirà percentatges d'augment de capacitat majors.

D'igual forma, s'arriba a la conclusió que com més gran sigui el grau de dispersió del *headway* d'un procés (interval temporal entre usuaris servits), pitjors resultats quant a nivell de capacitat oferirà el sistema de servidors tàndem.

Com més importància relativa tinguin el temps de reacció i el temps de posicionament en front del temps de servei d'un sistema de cues pitjor serà la millora de capacitat que el peatge en línia pot presentar-hi.

La tipologia de peatge en sèrie té la finalitat d'augmentar la capacitat que es pot oferir i, per tant, millorar el nivell de servei global de l'autopista cap a l'usuari. Així doncs, permet unes reduccions de les demores i les congestions que es tradueix en un benefici social. Ara bé, augmentar el nombre de carrils amb una sola cabina, tal i com s'ha fet sempre, també ofereix un increment de capacitat, però aquest augment no és tant eficaç quant a l'espai ocupat, és a dir, no aprofita tant bé l'espai disponible com el sistema tàndem, amb la qual cosa provoca un impacte ambiental major.

Per tant, està totalment justificat l'adopció del peatge tàndem en situacions en que existeixin una sèrie de barreres naturals o artificials que impedeixin augmentar el nombre de carrils. I dependrà del corresponent anàlisi econòmic en els casos en que l'espai disponible no sigui una restricció.

Un inconvenient actual d'augmentar excessivament el nombre de carrils d'un peatge és que, a mida que s'augmenta la capacitat de servei del peatge, en la secció posterior al peatge, on els vehicles convergeixen fins arribar un altre cop al tronc de l'autopista, es poden produir retencions ja que és transforma en un coll d'ampolla d'insuficient capacitat. En aquest sentit, el peatge en sèrie permet un augment de capacitat amb un menor nombre de carrils, així que la convergència dels vehicles serà més suau i no es produiran tant fàcilment aquestes retencions.

Per tal que el sistema de peatges en sèrie funcioni correctament i presenti tot el seu potencial quant a capacitat de servei oferta, és necessari que els usuaris coneguin el seu funcionament, sinó el tàndem podria arribar a comportar-se com un sistema de peatges habitual d'una sola cabina per carril. Això implica que és imprescindible una estratègia de difusió i pedagogia per reduir al màxim el nombre de vehicles que en realitzen un mal ús. Aquesta estratègia hauria d'estar definida per tres vies: publicitat als mitjans de comunicació prèvia a la implantació, senyalització a les proximitats dels peatges i senyalització al propis servidors o cabines.

Quant a l'aspecte mediambiental, la tipologia de servidors tàndem implica que els desplaçaments dins de a cua siguin de dues en dues posicions, així que es produeixen la meitat d'arrencades que en cas de servidors habituals, on per cada vehicle servit es produeix un cicle de desplaçament. Si es té en compte que en el procés d'arrencada els vehicles tenen un consum de combustible i una emissió de gasos puntual elevada, això comporta que els peatges en sèrie, en els casos en que es produeixin cues, comportaran una reducció considerable de les emissions de gasos contaminats i del consum de combustible, afavorint consegüentment la conservació del medi ambient.

El sistema de servidors en sèrie no només és aplicable a peatges d'autopista, és un sistema que pot ser aplicat a d'altres sistemes de cues. Però perquè aporti el seu màxim potencial, cal buscar situacions en les quals el temps de servei sigui relativament elevat i el *headway* (suma del temps de reacció, de posicionament i de servei) presenti poca dispersió. Així es podrien trobar aplicacions al món industrial on, a causa de la naturalesa dels processos, aquests presenten unes variabilitats en els temps menors que en el món dels transports.

Conclusions particulars pel cas de l'AP-7

Pel cas de l'autopista AP-7, concretament a través de les dades extretes del peatge de La Roca del Vallès, s'ha arribat a una sèrie de conclusions referents a l'augment de capacitat, el cost i, per tant, la viabilitat de cadascuna de les possibles alternatives per incrementar el nivell de servei del peatge. Aquestes alternatives són: crear nous carrils de tipologia habitual (amb una sola cabina per carril), afegir nous carrils del tipus tàndem o adaptar els carrils existents al sistema tàndem.

Es suposa que no hi ha barreres naturals ni artificials que impedeixin un augment de la plataforma de peatge, la qual cosa implicaria la obligatorietat d'optar pel peatge en sèrie com a solució per augmentar la capacitat.

Es conclou que l'opció d'adaptar els carrils existents en un peatge a la tipologia tàndem és inviable econòmicament, ja que ofereix un augment de capacitat menor que el que es podria obtenir amb d'altres alternatives pel mateix preu. Aquesta opció comporta uns costos elevats ja que requereix una actuació en els carrils útils del peatge, la qual cosa provoca molèsties al trànsit i una reducció temporal de la capacitat global del peatge.

Per al cas de la creació de nous carrils de peatge o la construcció d'un nou peatge sencer, la selecció entre la tipologia de carril habitual o tàndem depèn del tipus de cabina de pagament de que es tracti i de la magnitud de l'obra, és a dir, del nombre de carrils que es realitzin.

Així doncs, per al cas de cabines amb servidor automàtic (pagament amb targeta de crèdit), sempre és recomanable el sistema de carrils tàndem en front a l'habitual sigui quina sigui la magnitud de l'obra. Aquesta diferència s'accentua per casos en que el nombre de carrils que es pretengui crear sigui reduït, arribant a no haver-hi diferència entre les dues alternatives per casos amb un nombre molt gran de carrils, és a dir, peatges de nova creació molt extensos.

Això és així gràcies a que les cabines amb servidor automàtic presenten una millora de capacitat per carril en l'interval del 36% al 49% (arribant a un 52% en el cas ideal) en front als carrils amb un sol servidor. Aquest resultat està motivat per la petita variabilitat del temps de servei i per la importància relativa d'aquest temps en front als de reacció i de posicionament.

Per al cas dels servidors manuals i de recollida de tiquet, les millores de capacitat que ofereixen amb la tipologia tàndem són menors. La cabina de pagament manual és la que es comporta millor de les dues trobant-se en un interval comprès entre el 29% i el 39% (arribant a un 41% en el cas ideal). Aquesta diferència amb el servidor automàtic és degut a la major variabilitat del temps de servei que presenta la cabina manual. Per últim, quant a millora del nivell de servei oferta, es troba el carril de recollida de tiquet, el qual, si s'adaptés al sistema tàndem suposaria unes millores de capacitat entre el 27% i el 36% (arribant a un 38% en el cas ideal). Aquest tipus de carrils, tot i tenir poca dispersió en el temps de servei, la qual cosa juga en favor de la millora de capacitat, presenten una escassa millora de capacitat ja que el temps de servei associat és curt en relació al temps de reacció i de posicionament.

Així doncs, en el cas de creació de nous carrils de pagament manual o de recollida de tiquet, la tipologia de peatge en sèrie serà viable en front a la habitual en els casos en que la magnitud de l'obra sigui petita (es vulguin crear pocs carrils). En les cabines manuals el límit superior d'aquesta viabilitat es troba en 6 carrils, reduint-se fins a 4 carrils pel cas de recollida de tiquet. Així doncs, per obres de major envergadura, degut a la proporció dels costos fixos i variables és recomanable adoptar carrils d'una cabina. En canvi per ampliacions d'un reduït nombre de carrils, es aconsellable el sistema de dues cabines per carril.

Recerca futura

La idea del sistema de cues en sèrie o en línia no és només aplicable a peatges d'autopistes, sinó que se li poden trobar aplicacions en d'altres camps relacionats amb la teoria de cues. Així, una línia d'investigació a seguir és en quins àmbits es podria implantar el sistema tàndem. Sempre i quan es tinguin en compte les conclusions a les quals s'ha arribat en aquesta tesina, les quals demostren que no s'obtenen bons resultats en sistemes de cues on el temps de servei és curt en relació al temps de reacció i posicionament. Tampoc és interessant en processos amb una gran dispersió en els temps de servei. Així doncs, es creu que pot arribar a ser útil en aplicacions a la indústria on els temps associats tenen poca variabilitat o aquesta està més controlada.

Un altre aspecte que es podria estudiar a continuació d'aquesta tesina és la idea de peatge en línia ampliada a més de dos servidors en un mateix carril formant uns

conjunts (*batch* en literatura anglesa) de cabines. Aquesta idea ja va ser estudiada per Daganzo i Hall en el mateix estudi al qual s'ha fet referència en aquest text (Daganzo & Hall, 1982). La impressió inicial a nivell qualitatiu no dóna molt bones perspectives ja que, en aquest cas, l'extensió del peatge en la direcció del flux augmentaria de forma excessiva, havent d'incrementar la zona anterior i posterior al peatge, és a dir, la zona del weaving i del merging. Amb això augmentarien els costos associats a la construcció del peatge i probablement la viabilitat econòmica quedaria greument perjudicada, declarant l'opció de peatges en batch (de més de dues cabines per carril) inviable.

Seguint la mateixa ideologia que pren el peatge en línia, la qual és reduir l'espai ocupat per un sistema de peatge augmentant-ne la seva capacitat de servei, es pot arribar a aconseguir el *layout* més adequat per a un *toll plaza*. És a dir, la disposició de les cabines o *toll booth* que permeti ocupar l'espai de forma òptima quant a capacitat de tractament de vehicles sense haver de perdre el nivell de qualitat i servei ofert a l'usuari.

Un aspecte important a dur a terme posterior a aquest estudi és una prova d'implantació a un peatge real i en ús. Seria interessant realitzar una prova pilot per tal de poder comprovar els resultats i conclusions a les quals s'ha arribat. Aquests resultats han estat contrastats a través de diferents metodologies independents (formulació analítica i simulació informàtica) però amb una prova a un peatge d'autopista amb un flux de vehicles real es podria obtenir ràpidament un nivell de seguretat en què els resultats són correctes.

El peatge més adequat per tal de comprovar els resultats és el de La Roca de Vallès, ja que és d'on s'han extret les dades. Però també seria interessant comprovar en altres *toll plaza* el seu comportament. Això si, s'ha de tenir en compte que els resultats poden ser diferents als obtinguts en aquest estudi, ja que poden tenir uns altres temps de servei en funció de si és un peatge tancat o obert, l'import de la taxa del peatge, etc. Però la formulació analítica i la simulació informàtica permeten obtenir el resultat corresponent prenent les variables que calgui.

Agraïments

L'autor d'aquesta tesina vol donar el seu agraïment a en Francesc Robusté, Miquel Estrada i Antoni Vallès per tota l'ajuda i idees aportades, així com a en Joan Altarriba i altres companys d'Abertis per la informació facilitada, sense la qual hauria estat impossible la realització d'aquest estudi.

Referències

Cetres Enginyers. (2002). *Proyecto complementario de ampliación de la estación de peaje de Alfajarín*. Autopista A-2.

Daganzo, C. F., & Hall, R. W. (1982). *Tandem Toll Booths for the Golden Gate Bridge*. University of California: Institute of Transportation Studies.

Hillier, & Lieberman. (2002). *Invesitgación de Operaciones*. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A.

Schaufler, A. E. (1997). *Toll Plaza Design. A Synthesis of Highway Practice. NCHRP Synthesis 240*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

Soriguera, F. (2008). *Estimació del temps de vitge en una autopista a partir de diferents fonts d'informació*. Barcelona.

Annexes

Annex A: Tractament estadístic de les variables

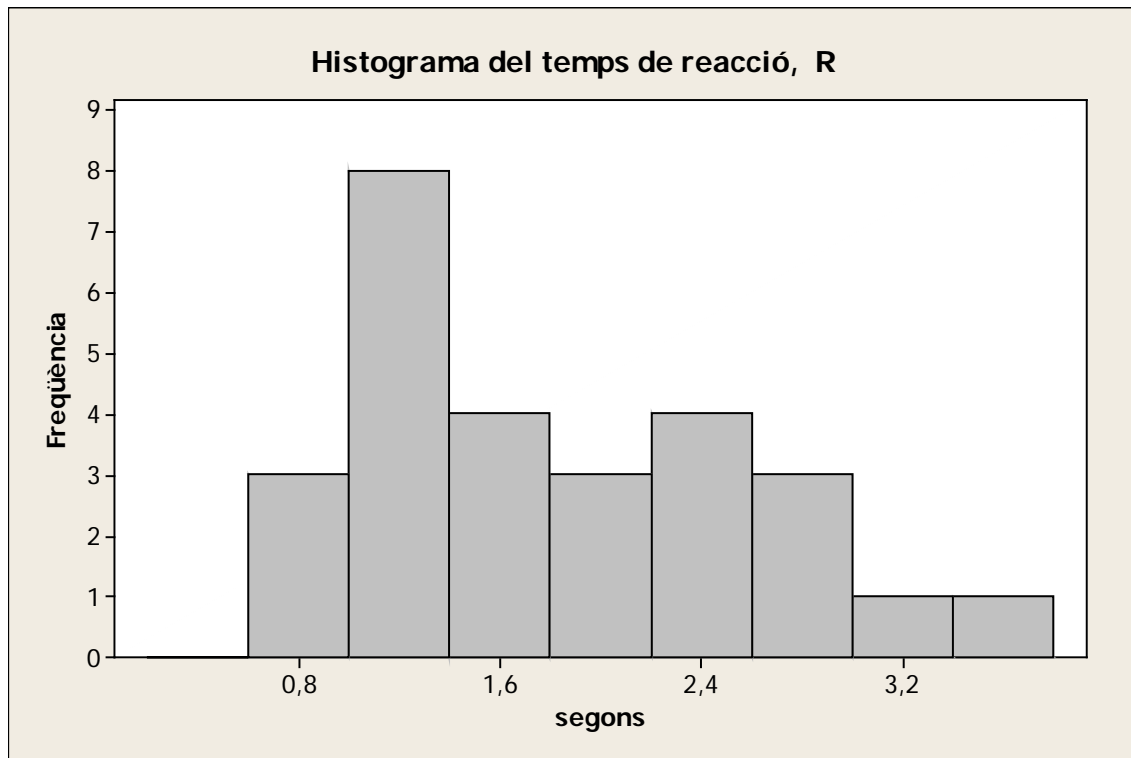
Les dades que s'han emprat a continuació van ser obtingudes el dijous dia 19 de març de 2009 al peatge de la Roca del Vallès. L'interval de presa de dades fou de 11:00 a 13:00 hores. La climatologia no presentà cap alteració al comportament dels vehicles. Algunes dades es van prendre de forma directa a l'instant i d'altres van ser enregistrades en vídeo i posteriorment van ser analitzades mitjançant repètides visualitzacions.

Les dades corresponen al peatge de la Roca del Vallès, el qual és un peatge tancat. En sentit nord els vehicles només recullen tiquet i en sentit sud entreguen tiquet i realitzen el pagament de la taxa corresponent.

Tot el tractament estadístic d'aquestes dades s'ha dut a terme amb un programa específic anomenat Minitab (versió 14).

1. Temps de Reacció (R)

Histograma obtingut amb les dades de camp:



D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|---------|----------|--------|-----|-----|----------|-----------|
| 27 | 0 | 1,74074 | 0,821471 | 1,6 | 0,6 | 3,5 | 0,500011 | -0,858235 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

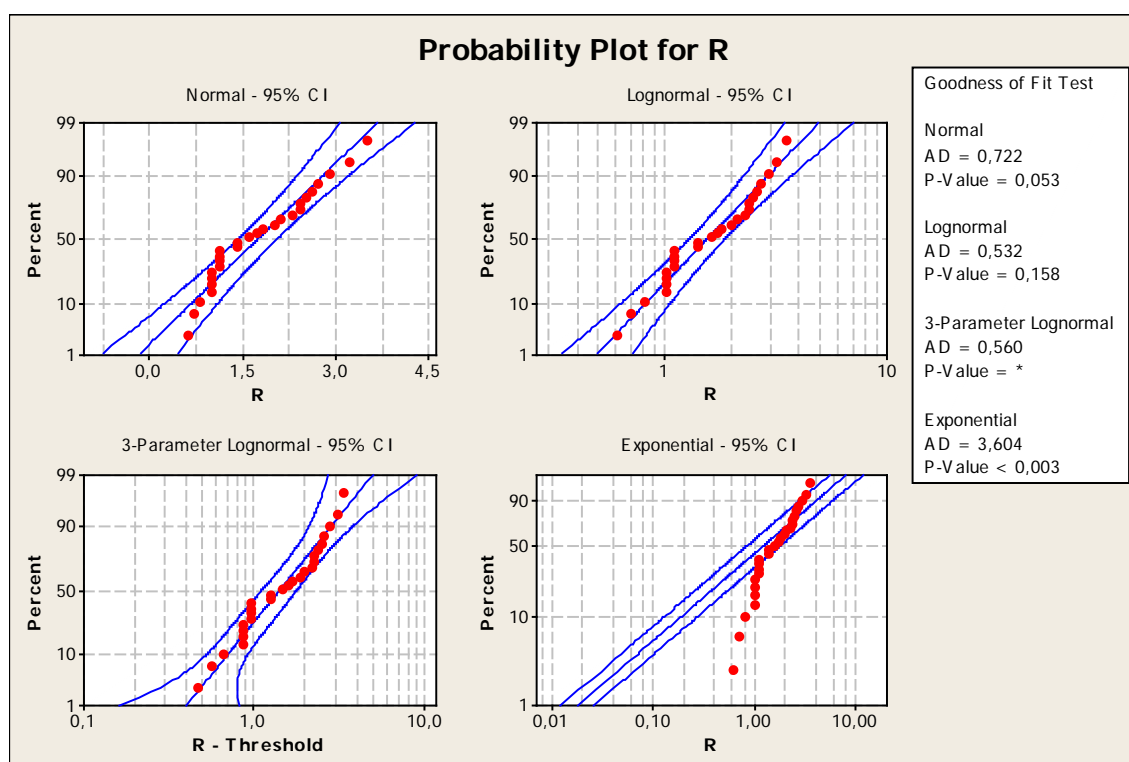
Qualitat de l'ajust:

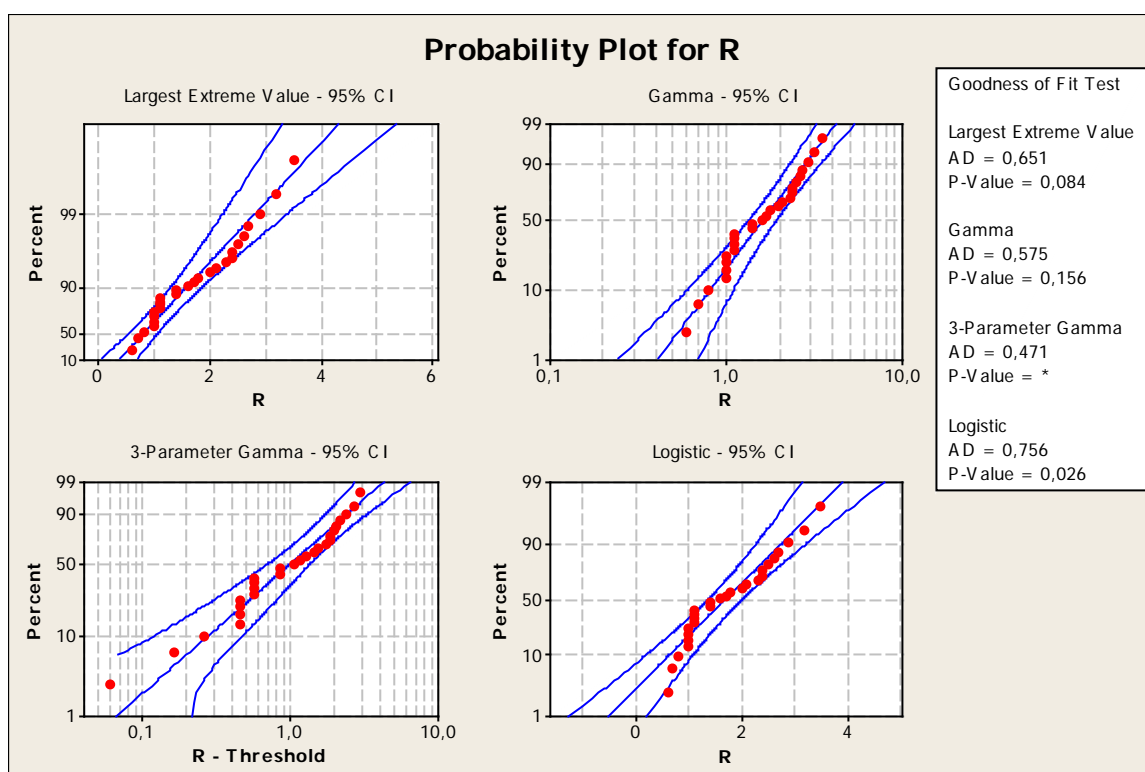
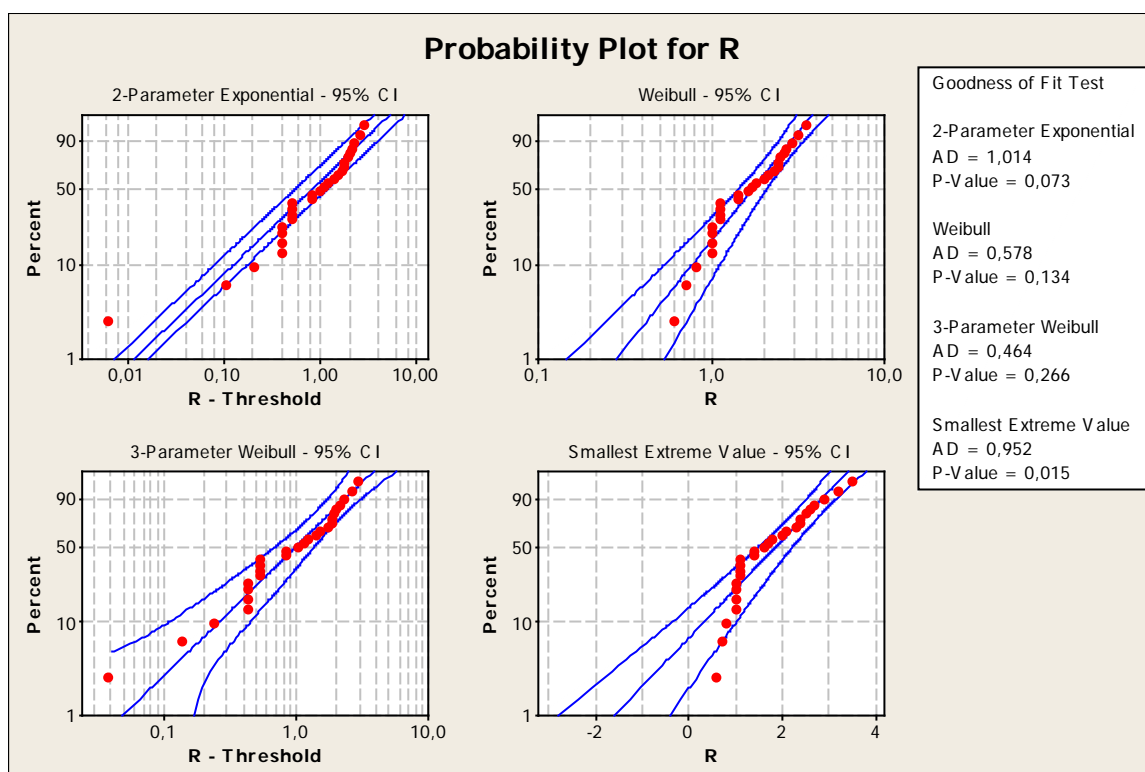
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Normal | 0,722 | 0,053 | |
| Lognormal | 0,532 | 0,158 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,560 | * | 0,825 |
| Exponential | 3,604 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 1,014 | 0,073 | 0,000 |
| Weibull | 0,578 | 0,134 | |
| 3-Parameter Weibull | 0,464 | 0,266 | 0,072 |
| Smallest Extreme Value | 0,952 | 0,015 | |
| Largest Extreme Value | 0,651 | 0,084 | |
| Gamma | 0,575 | 0,156 | |
| 3-Parameter Gamma | 0,471 | * | 0,207 |
| Logistic | 0,756 | 0,026 | |
| Loglogistic | 0,612 | 0,072 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,593 | * | 0,539 |

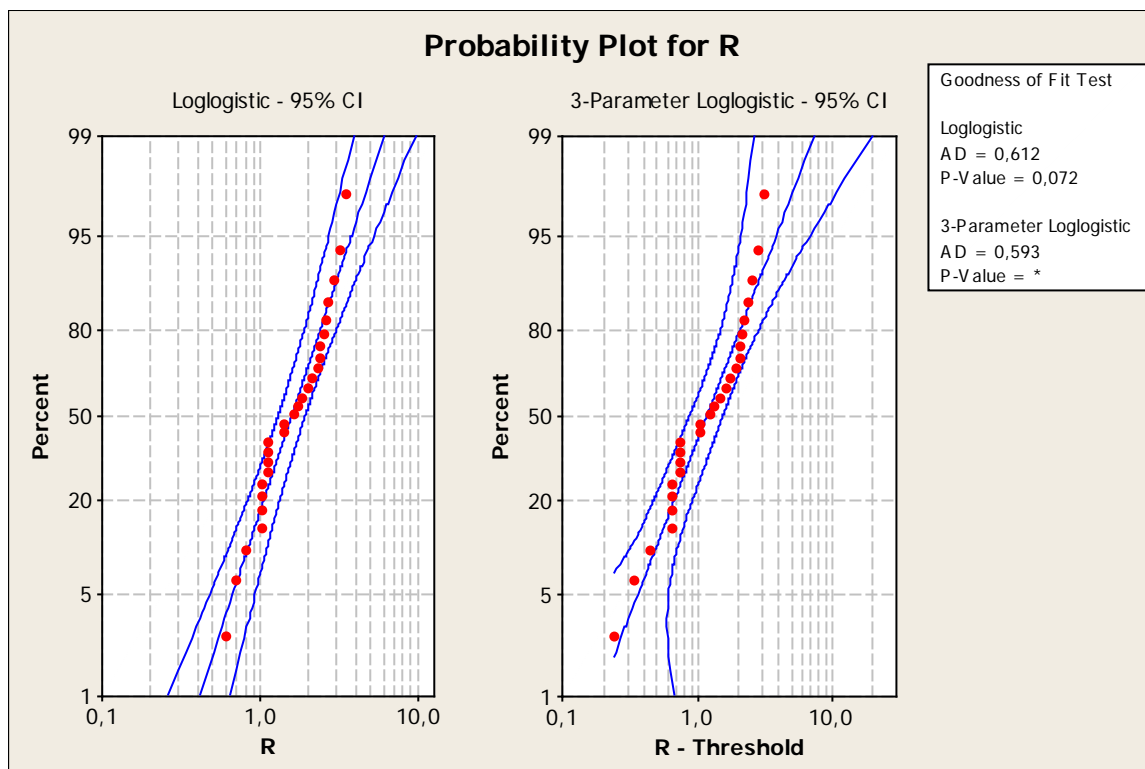
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|---------|---------|-----------|
| Normal* | 1,74074 | | 0,82147 | |
| Lognormal* | 0,44135 | | 0,49388 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,33396 | | 0,53911 | 0,13891 |
| Exponential | | | 1,74074 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 1,14674 | 0,59400 |
| Weibull | | 2,33931 | 1,97382 | |
| 3-Parameter Weibull | | 1,40186 | 1,28770 | 0,56285 |
| Smallest Extreme Value | 2,15944 | | 0,82177 | |
| Largest Extreme Value | 1,35934 | | 0,64348 | |
| Gamma | | 4,58659 | 0,37953 | |
| 3-Parameter Gamma | | 1,73761 | 0,69124 | 0,53963 |
| Logistic | 1,68730 | | 0,48440 | |
| Loglogistic | 0,44661 | | 0,29481 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,14605 | | 0,40198 | 0,36586 |

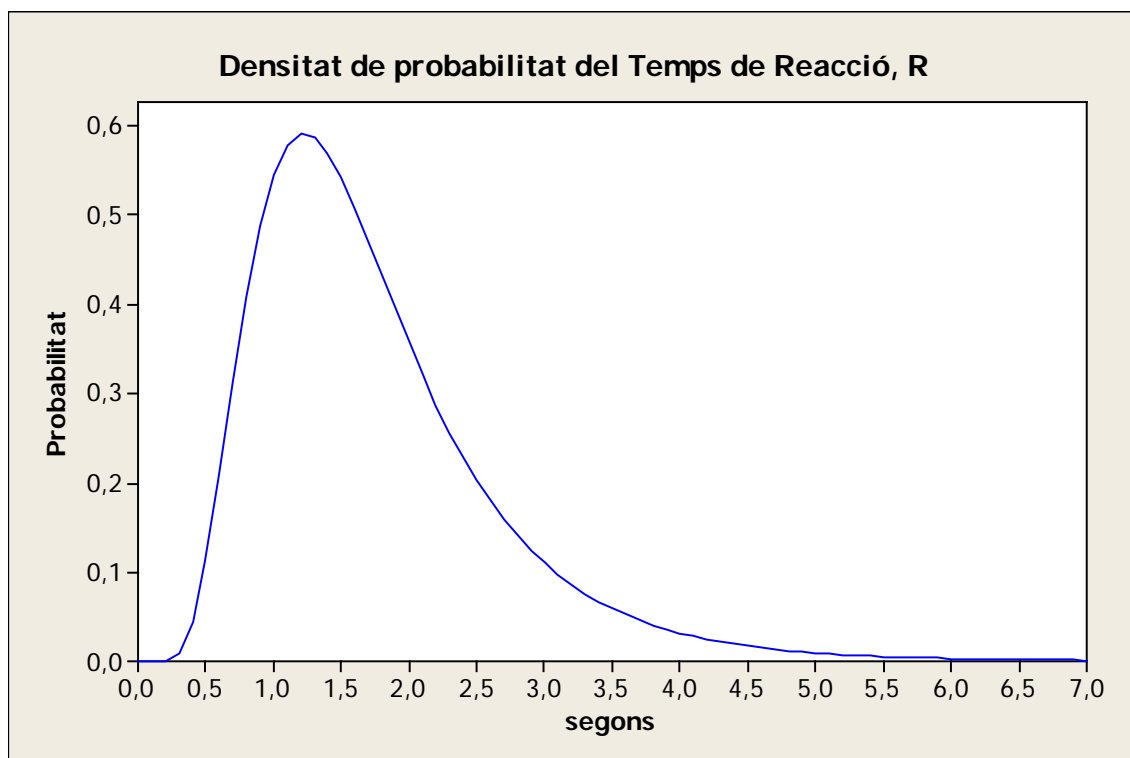
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:







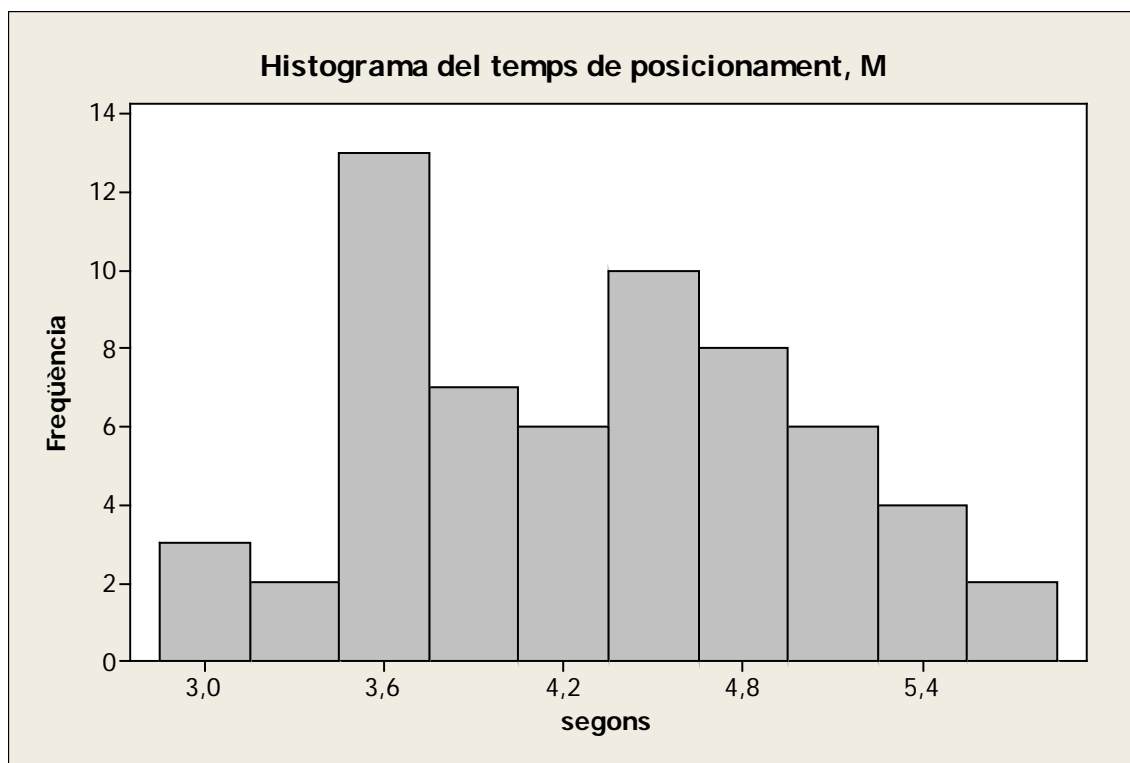
A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 0,44135 i 0,49388**, degut al valor relativament gran de P (taula anterior: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. Si extraïem la seva densitat de probabilitat:



2. Temps de posicionament (M, ΔM)

Temps de posicionament M

Histograma obtingut amb les dades de camp:



D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|---------|----------|--------|-----|-----|----------|-----------|
| 61 | 0 | 4,30656 | 0,708253 | 4,3 | 2,9 | 5,7 | 0,123385 | -0,831606 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

Qualitat de l'ajust:

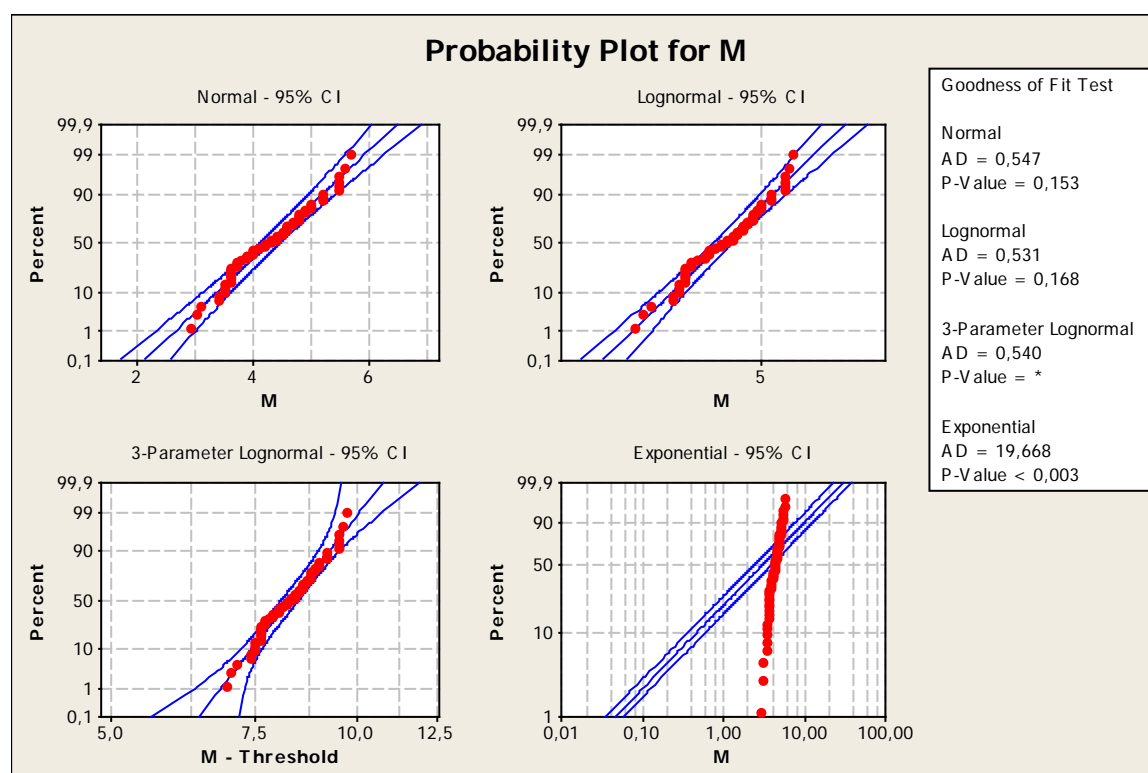
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|--------|--------|-------|
| Normal | 0,547 | 0,153 | |
| Lognormal | 0,531 | 0,168 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,540 | * | 0,584 |
| Exponential | 19,668 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 6,701 | <0,010 | 0,000 |
| Weibull | 0,691 | 0,070 | |
| 3-Parameter Weibull | 0,465 | 0,223 | 0,036 |
| Smallest Extreme Value | 1,064 | <0,010 | |
| Largest Extreme Value | 0,666 | 0,081 | |
| Gamma | 0,534 | 0,191 | |
| 3-Parameter Gamma | 0,534 | * | 0,990 |
| Logistic | 0,657 | 0,050 | |
| Loglogistic | 0,659 | 0,050 | |

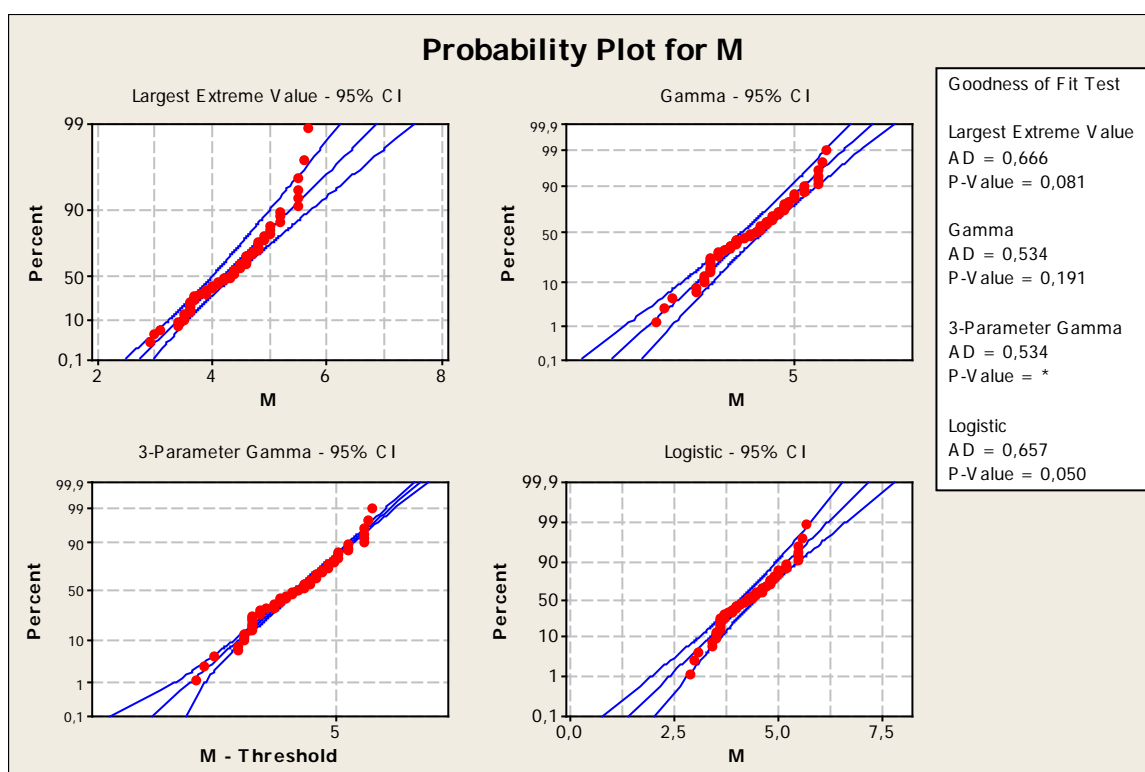
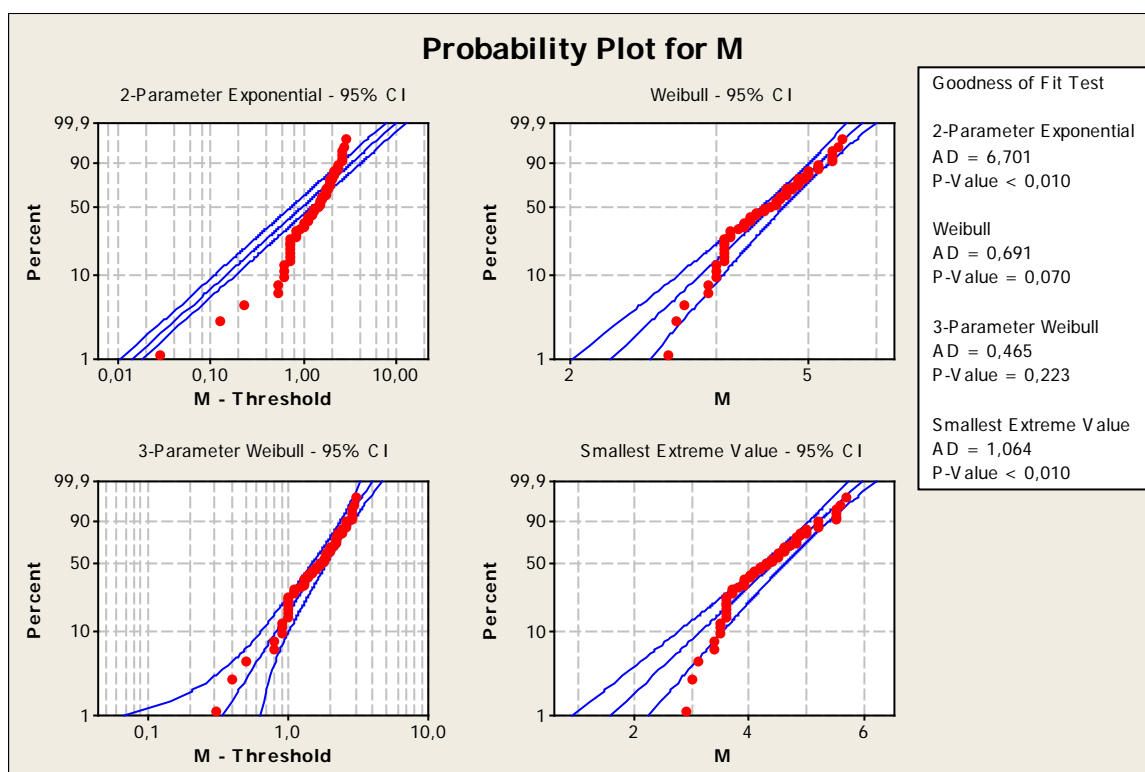
3-Parameter Loglogistic 0,649 * 0,790

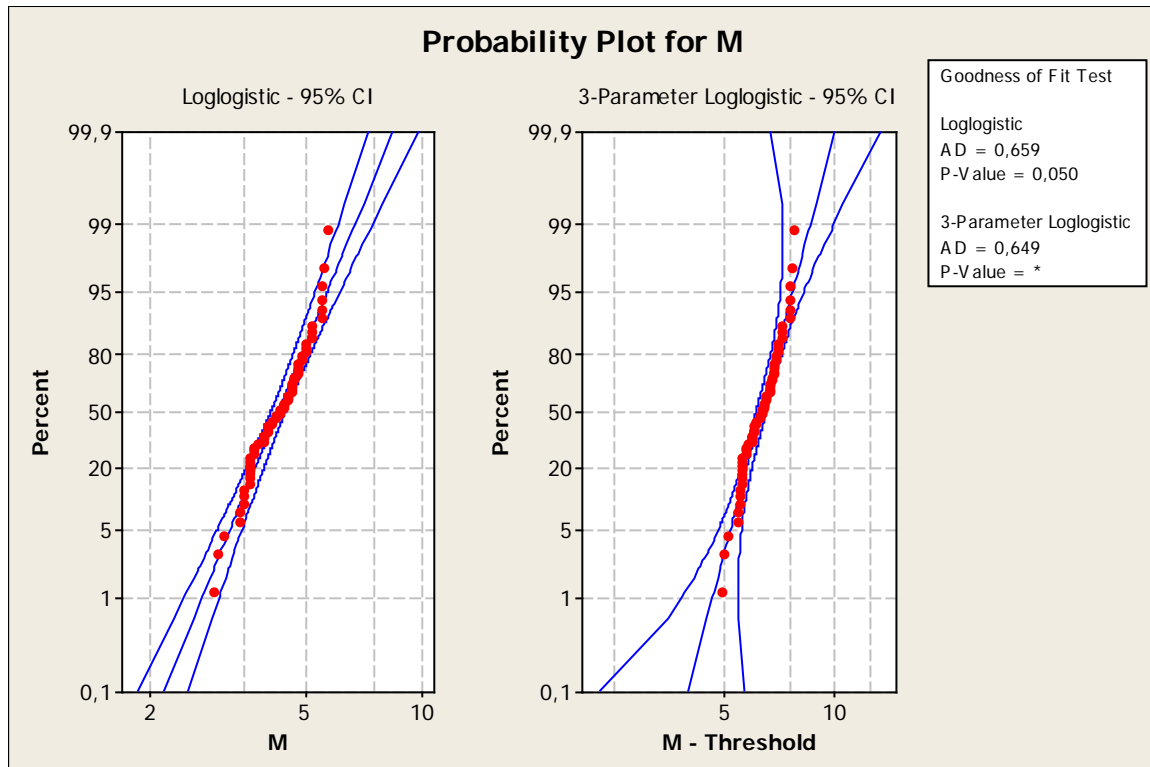
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|----------|---------|-----------|
| Normal* | 4,30656 | | 0,70825 | |
| Lognormal* | 1,44663 | | 0,16668 | |
| 3-Parameter Lognormal | 2,11434 | | 0,08457 | -4,00724 |
| Exponential | | | 4,30656 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 1,43556 | 2,87100 |
| Weibull | | 6,76189 | 4,60792 | |
| 3-Parameter Weibull | | 2,66189 | 1,93086 | 2,59244 |
| Smallest Extreme Value | 4,66089 | | 0,67094 | |
| Largest Extreme Value | 3,96066 | | 0,63718 | |
| Gamma | | 37,16535 | 0,11588 | |
| 3-Parameter Gamma | | 38,51573 | 0,11379 | -0,07614 |
| Logistic | 4,29458 | | 0,41879 | |
| Loglogistic | 1,44955 | | 0,09834 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 1,83268 | | 0,06690 | -1,97876 |

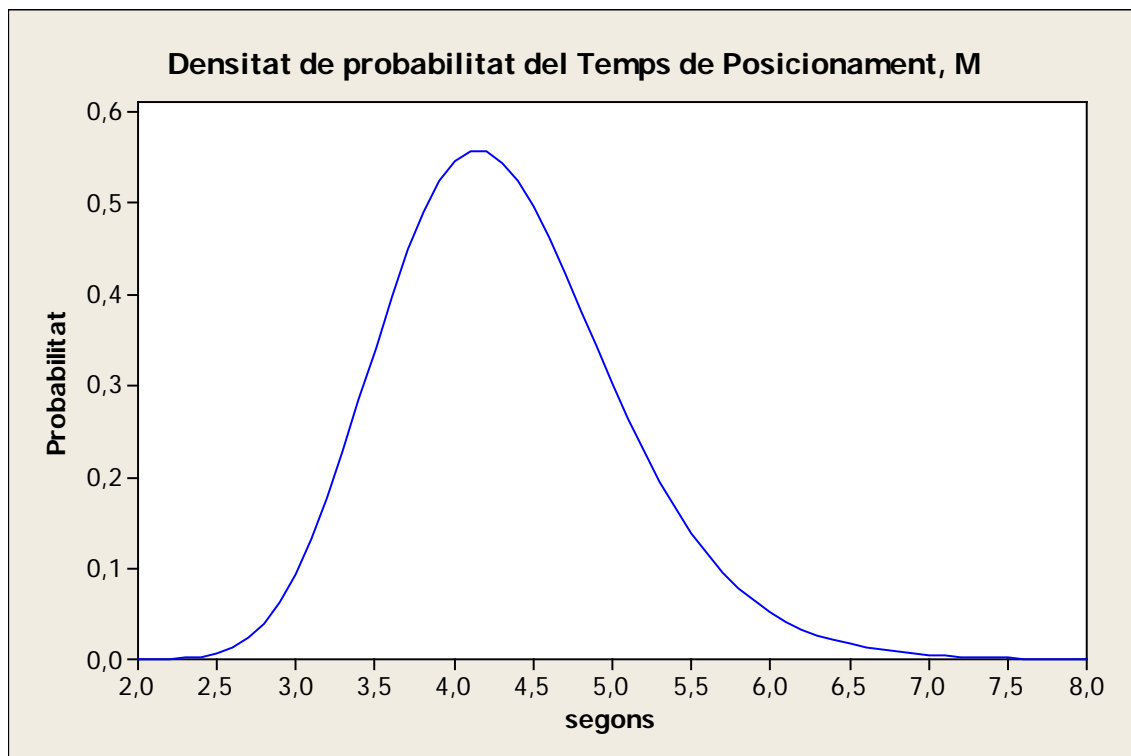
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:





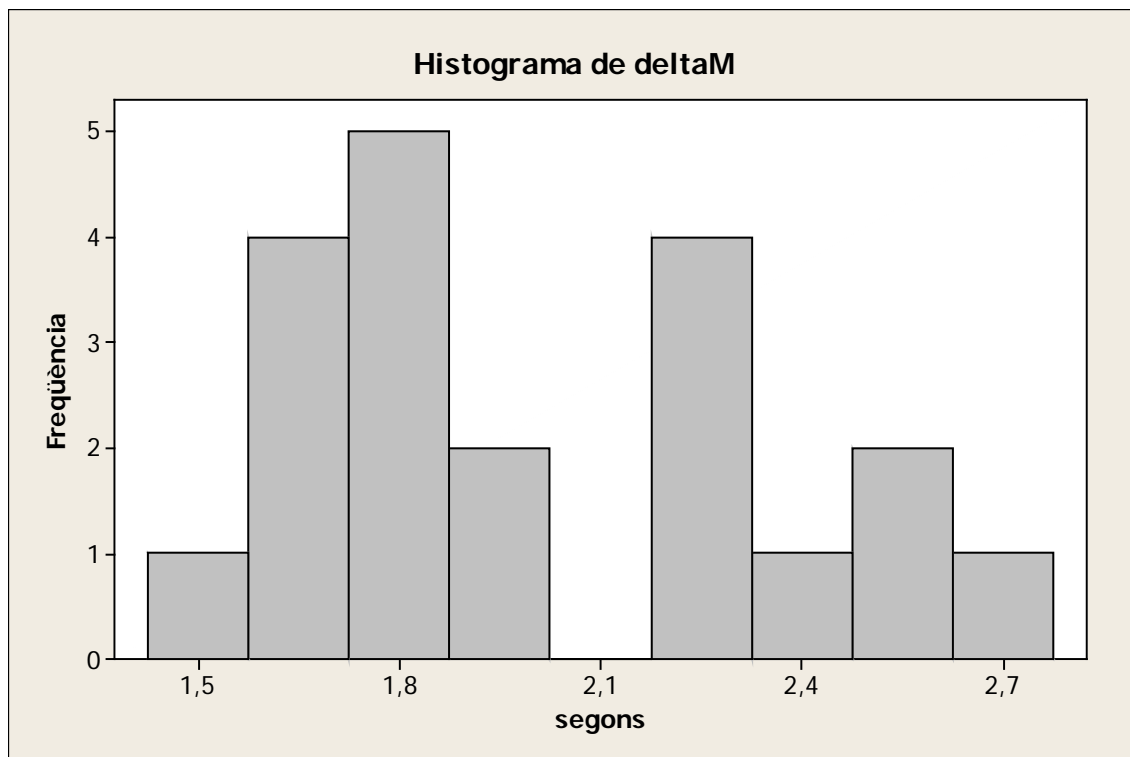


A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 1,44663 i 0,16668**, degut al valor relativament gran de P (taula anterior: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. Si extraïem la seva corba de densitat de probabilitat:



Temps de posicionament ΔM

Histograma obtingut amb les dades de camp:



D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|------|----------|--------|-----|-----|----------|-----------|
| 20 | 0 | 2,01 | 0,347775 | 1,85 | 1,5 | 2,7 | 0,482491 | -0,994292 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

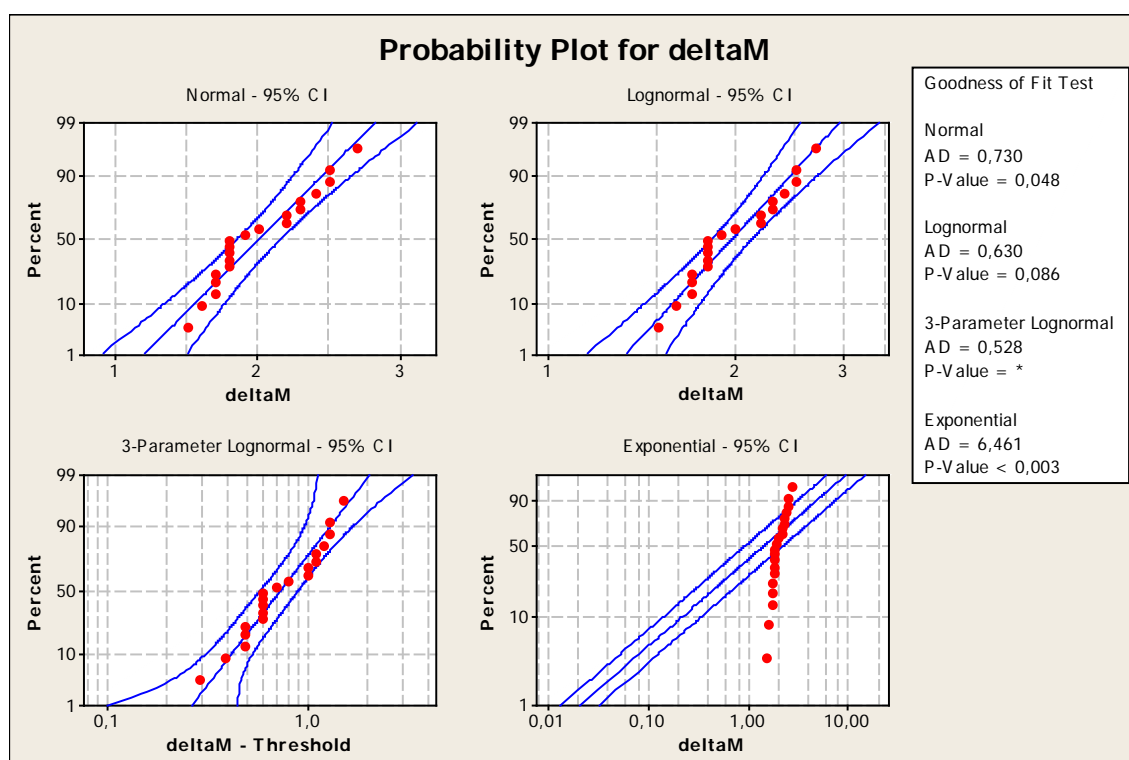
Qualitat de l'ajust:

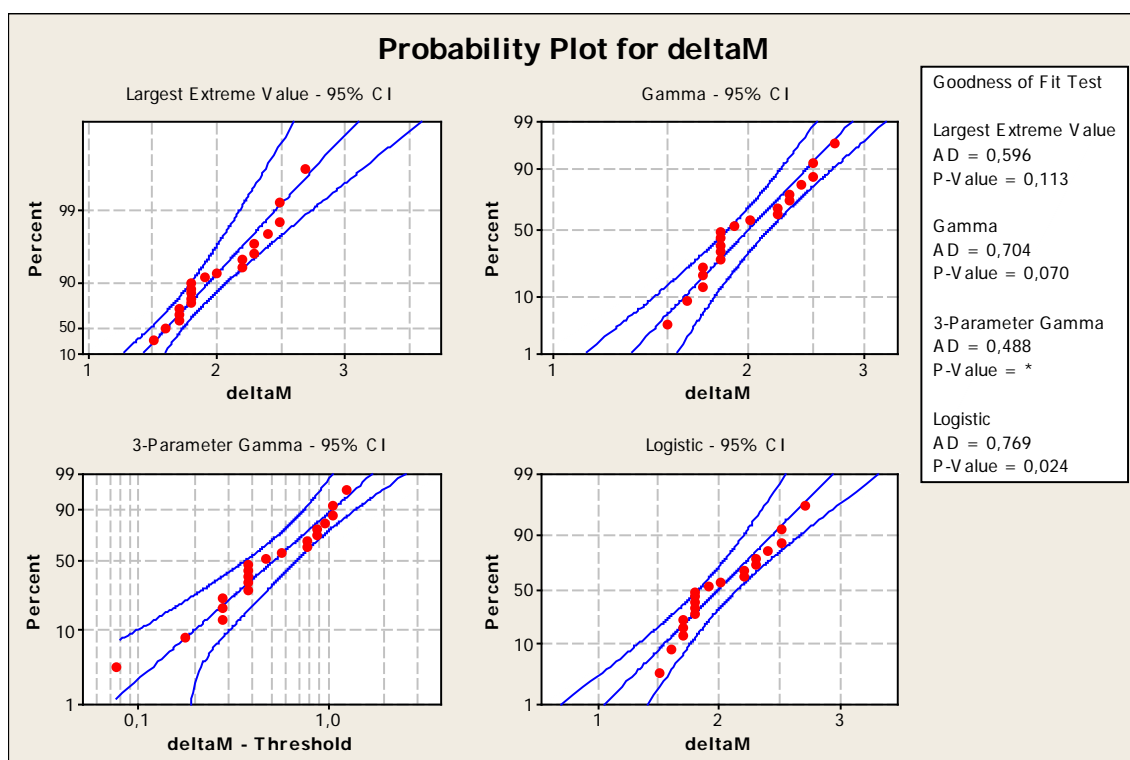
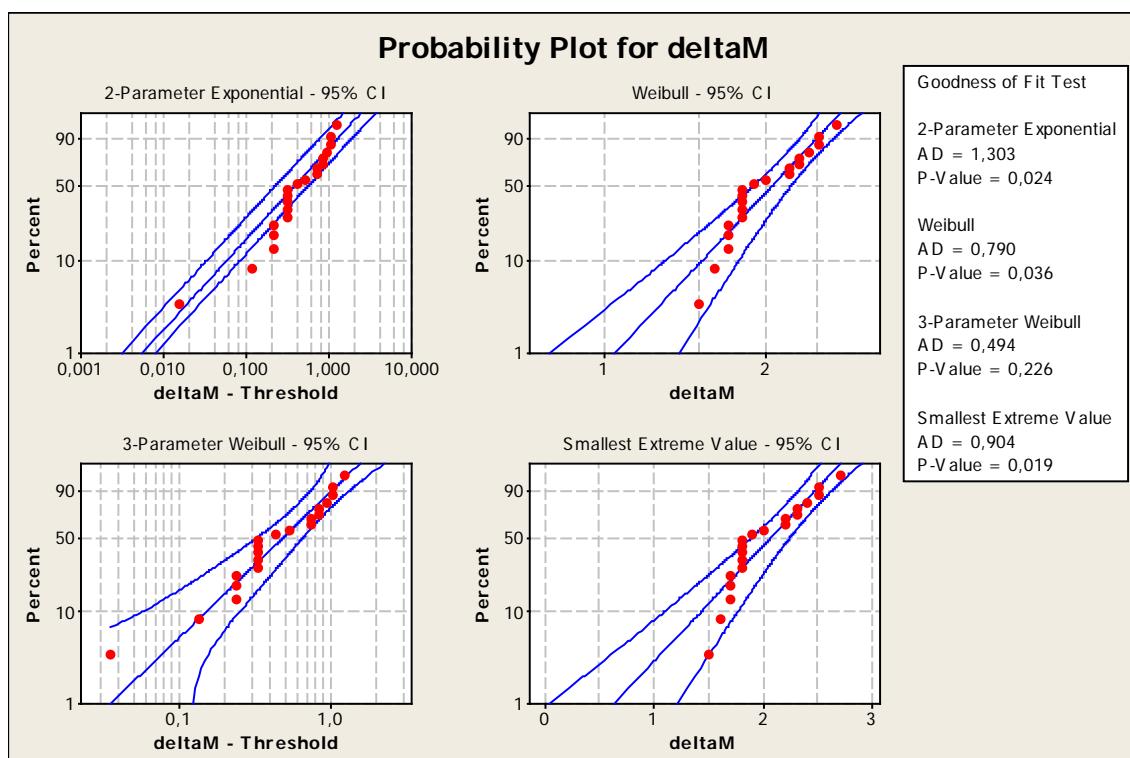
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Normal | 0,730 | 0,048 | |
| Lognormal | 0,630 | 0,086 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,528 | * | 0,318 |
| Exponential | 6,461 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 1,303 | 0,024 | 0,000 |
| Weibull | 0,790 | 0,036 | |
| 3-Parameter Weibull | 0,494 | 0,226 | 0,025 |
| Smallest Extreme Value | 0,904 | 0,019 | |
| Largest Extreme Value | 0,596 | 0,113 | |
| Gamma | 0,704 | 0,070 | |
| 3-Parameter Gamma | 0,488 | * | 0,165 |
| Logistic | 0,769 | 0,024 | |
| Loglogistic | 0,688 | 0,042 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,530 | * | 0,230 |

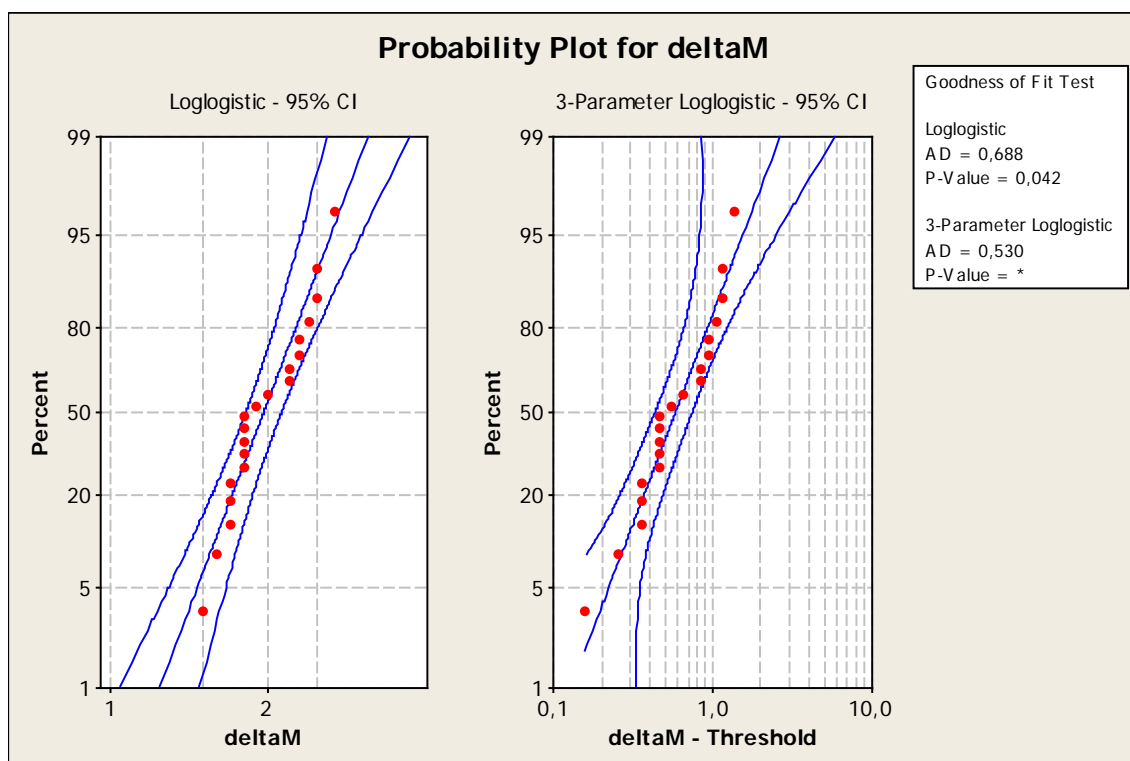
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|----------|---------|-----------|
| Normal* | 2,01000 | | 0,34777 | |
| Lognormal* | 0,68427 | | 0,16990 | |
| 3-Parameter Lognormal | -0,31511 | | 0,43877 | 1,20907 |
| Exponential | | | 2,01000 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 0,52500 | 1,48500 |
| Weibull | | 6,30278 | 2,15701 | |
| 3-Parameter Weibull | | 1,61056 | 0,60663 | 1,46547 |
| Smallest Extreme Value | 2,18570 | | 0,33972 | |
| Largest Extreme Value | 1,84946 | | 0,27225 | |
| Gamma | | 36,21861 | 0,05550 | |
| 3-Parameter Gamma | | 2,60531 | 0,22489 | 1,42409 |
| Logistic | 1,98533 | | 0,20462 | |
| Loglogistic | 0,67626 | | 0,10070 | |
| 3-Parameter Loglogistic | -0,54156 | | 0,33203 | 1,34665 |

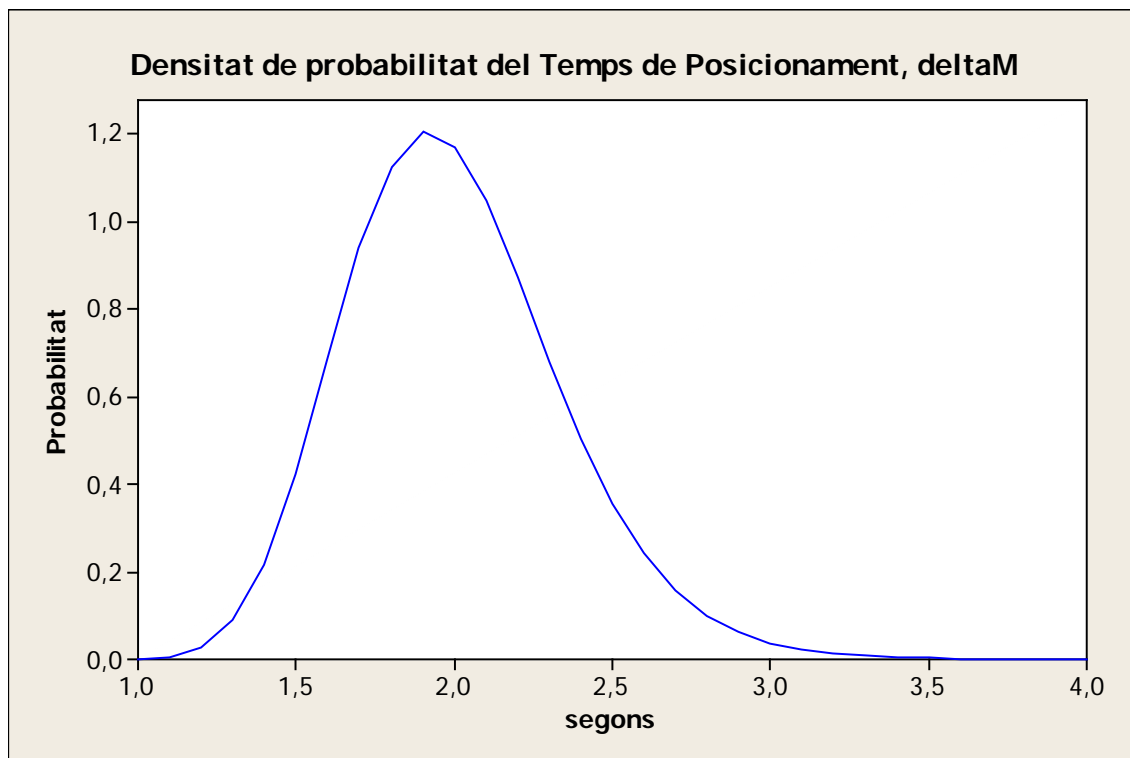
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:







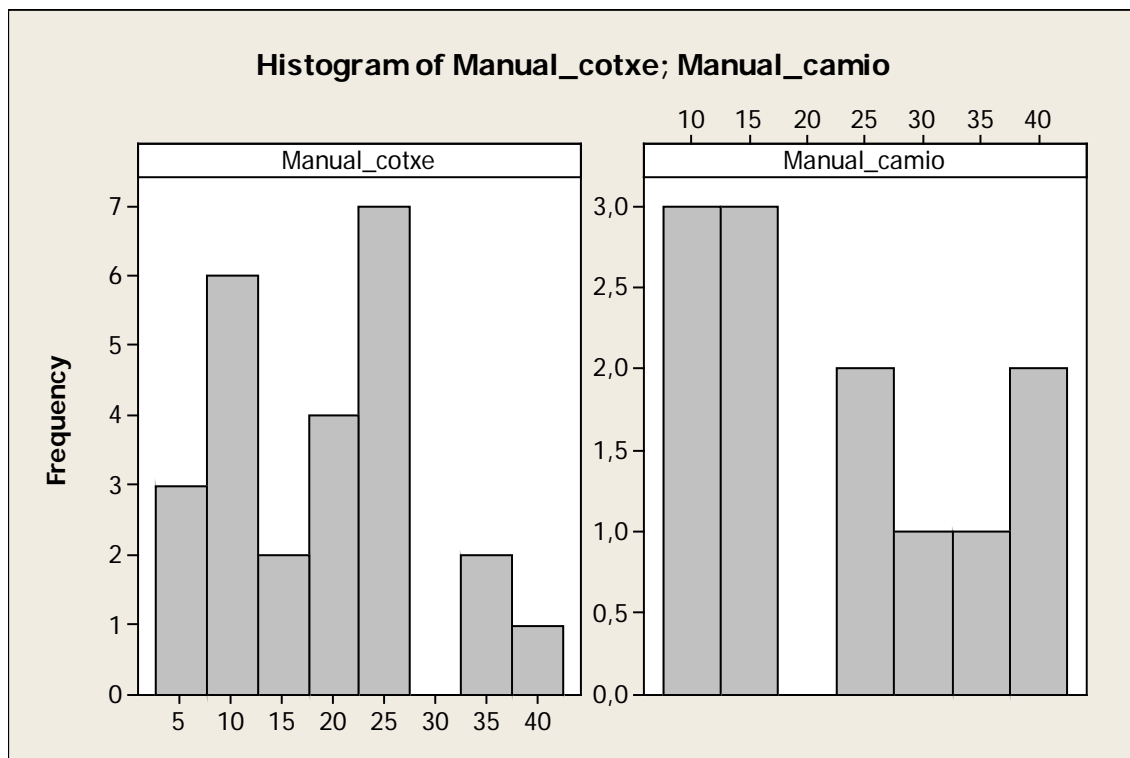
A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 0,68427 i 0,16990**, degut al valor relativament gran de P (taula anterior: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. Si extraïem la seva densitat de probabilitat tenim:



3. Temps de servei o parada (S)

Cabines manuals (S_m)

Les dades de camp relatives al temps de servei de cabines manuals es van classificar, inicialment, en funció de si el vehicle servit era un camió o un cotxe, així s'obtenen els següents histogrames:



A la vista dels resultats i entenent que el temps que tarda un vehicle per efectuar el pagament no es veu influenciat pel tipus de vehicle, sinó només pel tipus de cabina, es decideix agrupar els dos grups de dades. Per poder agrupar-los, es comprova que puguin pertànyer a una mateixa distribució realitzant un Test T-Student. Els resultats són els següents:

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|------------|----|------|-------|---------|
| Manu_cotxe | 25 | 18,8 | 10,1 | 2,0 |
| Manu_camio | 12 | 22,8 | 11,1 | 3,2 |

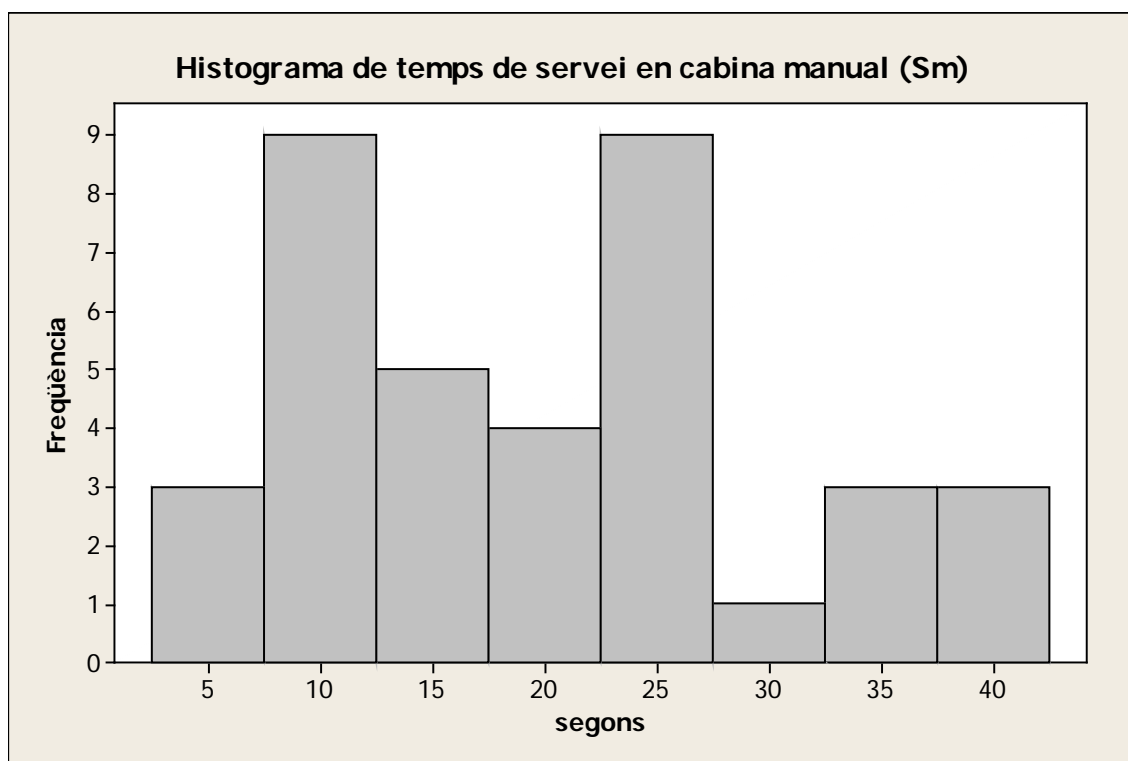
Difference = μ (Manu_cotxe) - μ (Manu_camio)

Estimate for difference: -3,91000

95% CI for difference: (-11,85362; 4,03362)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1,03 P-Value = 0,316 DF = 19

Com que el P-value es relativament gran (superior a 0,25) s'accepta la hipòtesi que ambdós grups de dades pertanyin a una mateixa distribució, quedant l'histograma unificat així:



D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|---------|---------|--------|-----|-----|----------|-----------|
| 37 | 0 | 20,1081 | 10,4477 | 20 | 4 | 42 | 0,502771 | -0,618395 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

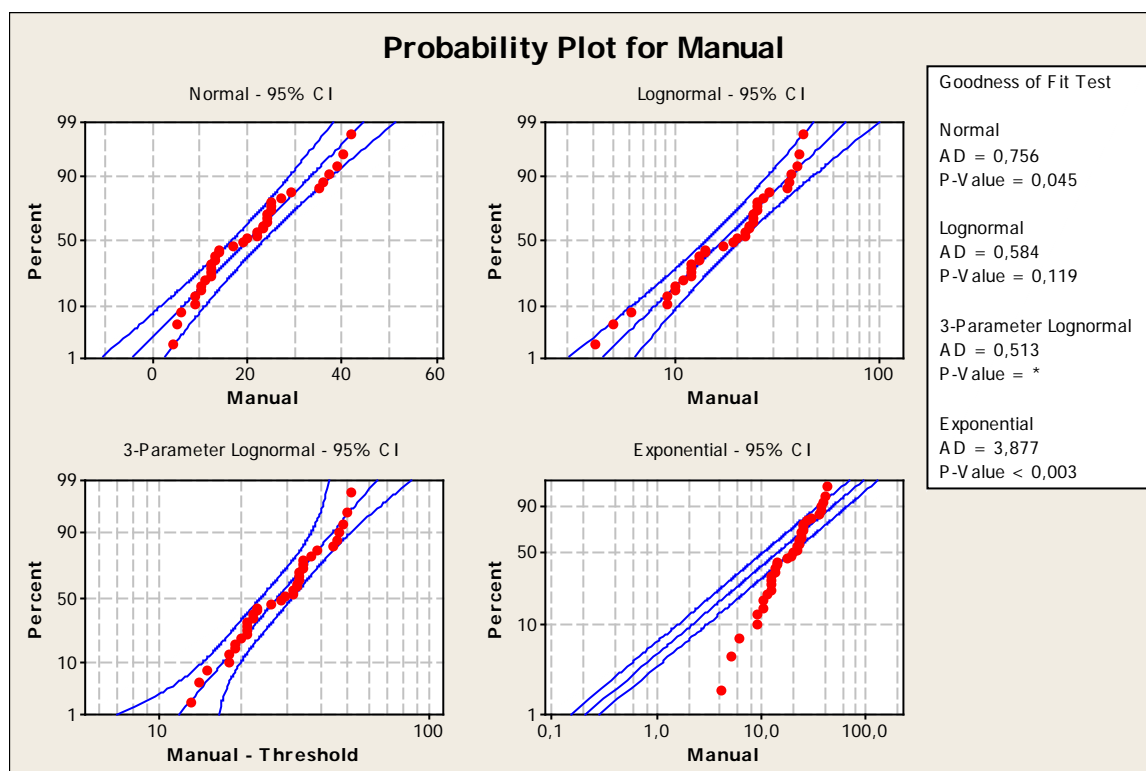
Qualitat de l'ajust:

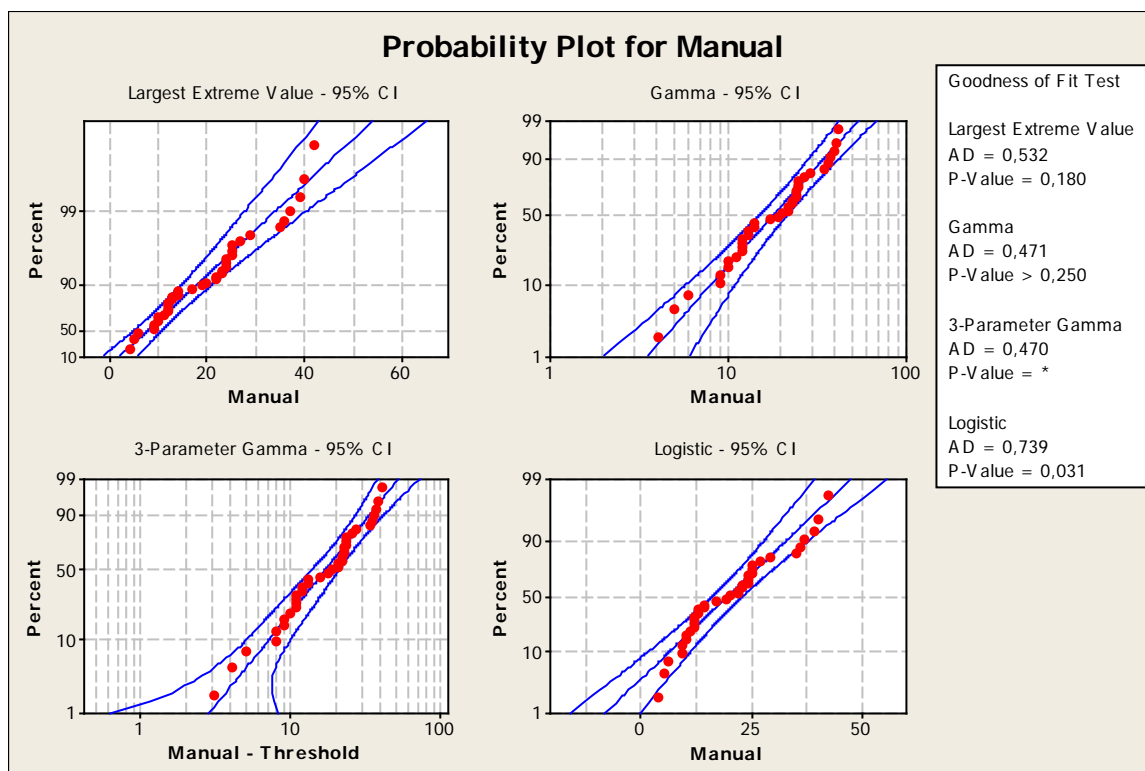
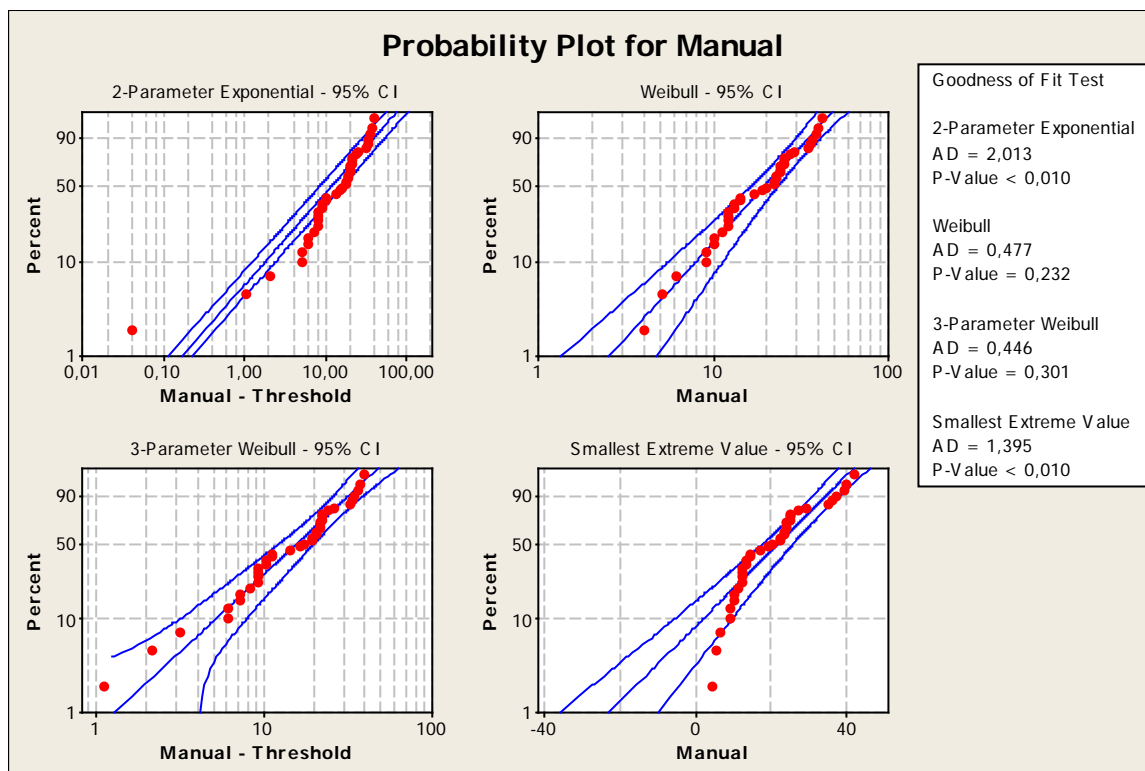
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Normal | 0,756 | 0,045 | |
| Lognormal | 0,584 | 0,119 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,513 | * | 0,221 |
| Exponential | 3,877 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 2,013 | <0,010 | 0,000 |
| Weibull | 0,477 | 0,232 | |
| 3-Parameter Weibull | 0,446 | 0,301 | 0,321 |
| Smallest Extreme Value | 1,395 | <0,010 | |
| Largest Extreme Value | 0,532 | 0,180 | |
| Gamma | 0,471 | >0,250 | |
| 3-Parameter Gamma | 0,470 | * | 0,858 |
| Logistic | 0,739 | 0,031 | |
| Loglogistic | 0,607 | 0,075 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,578 | * | 0,545 |

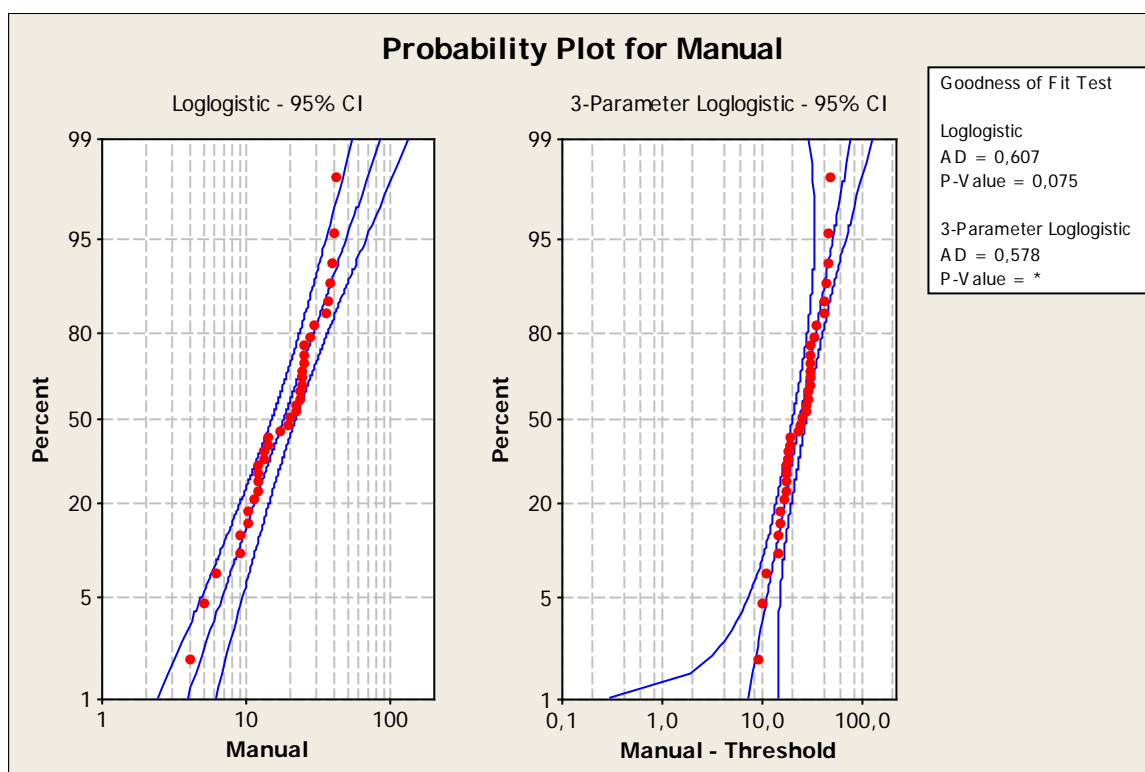
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|---------|----------|-----------|
| Normal* | 20,10811 | | 10,44771 | |
| Lognormal* | 2,85008 | | 0,58966 | |
| 3-Parameter Lognormal | 3,30702 | | 0,36093 | -8,99320 |
| Exponential | | | 20,10811 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 16,14811 | 3,96000 |
| Weibull | | 2,07609 | 22,76850 | |
| 3-Parameter Weibull | | 1,68521 | 19,22522 | 2,91077 |
| Smallest Extreme Value | 25,47637 | | 10,61446 | |
| Largest Extreme Value | 15,22513 | | 8,44769 | |
| Gamma | | 3,46810 | 5,79802 | |
| 3-Parameter Gamma | | 3,05801 | 6,26485 | 0,95010 |
| Logistic | 19,45216 | | 6,04954 | |
| Loglogistic | 2,88337 | | 0,33761 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 3,13662 | | 0,25725 | -4,79655 |

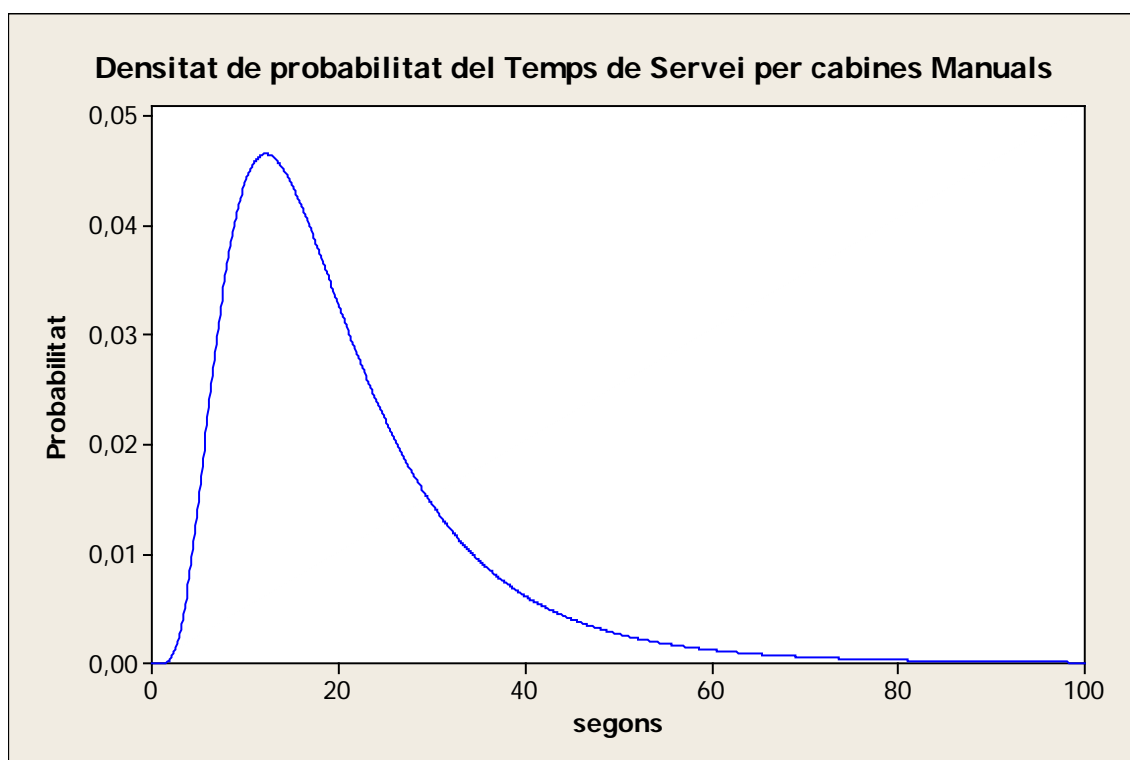
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:





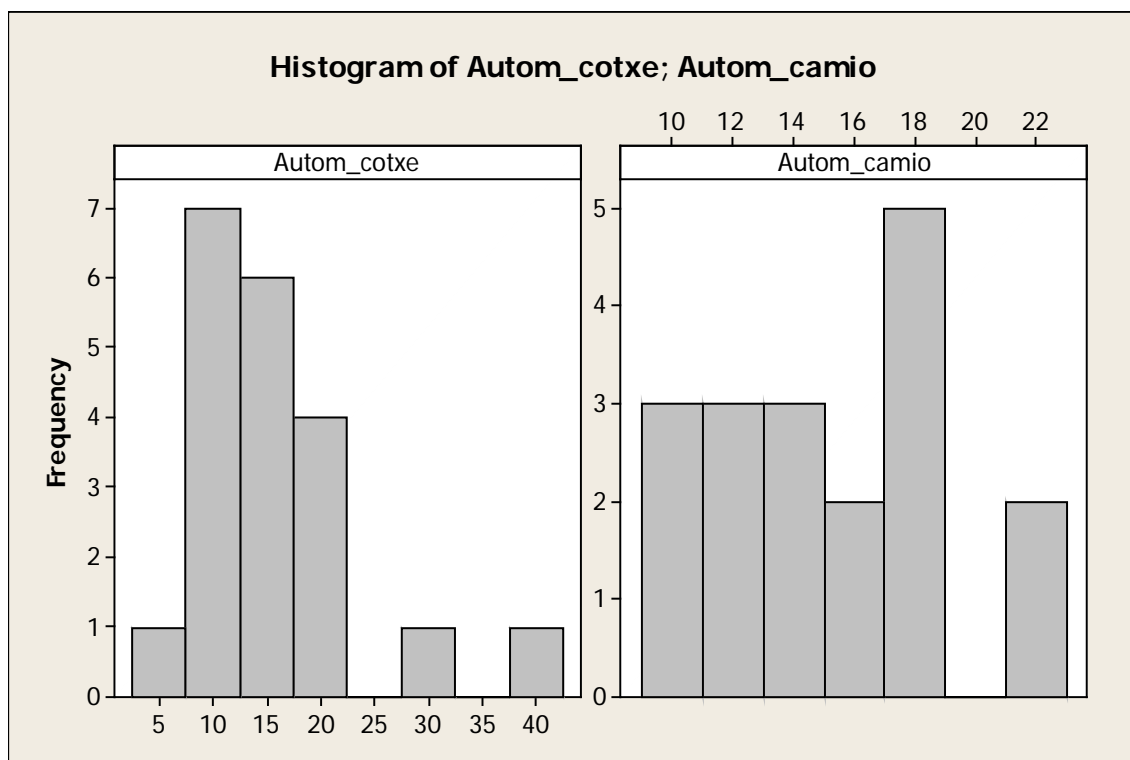


A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 2,85008 i 0,58966**, degut al valor relativament gran de P (taula anterior: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. La seva funció densitat de probabilitat té el següent aspecte:



Cabines automàtiques (S_a)

Les dades de camp relatives al temps de servei de cabines manuals es van classificar, inicialment, en funció de si el vehicle servit era un camió o un cotxe, així s'obtenen els següents histogrames:



A la vista dels resultats i entenent que el temps que tarda un vehicle per efectuar el pagament no es veu influenciat pel tipus de vehicle, sinó només pel tipus de cabina, es decideix agrupar els dos grups de dades. Per poder agrupar-los, es comprova que puguin pertànyer a una mateixa distribució realitzant un Test T-Student. Els resultats són els següents:

| | N | Mean | StDev | SE Mean |
|-------------|----|-------|-------|---------|
| Autom_cotxe | 20 | 15,90 | 7,31 | 1,6 |
| Autom_camio | 18 | 14,72 | 3,91 | 0,92 |

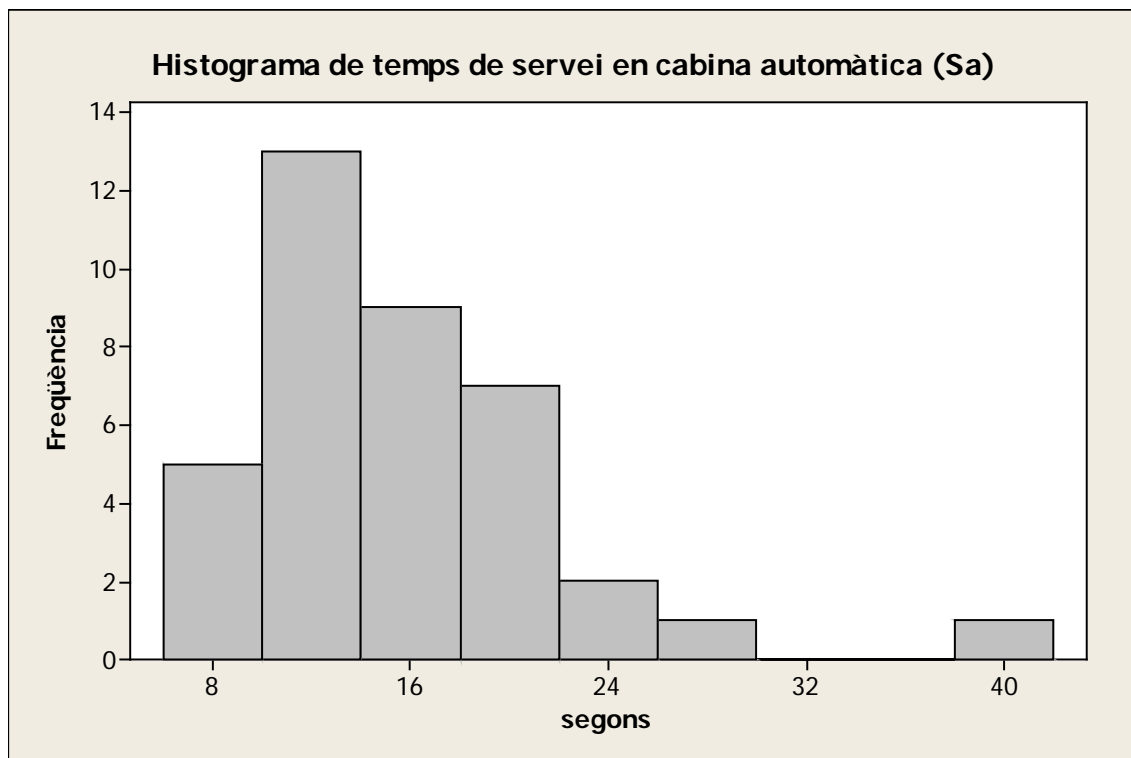
Difference = μ (Autom_cotxe) - μ (Autom_camio)

Estimate for difference: 1,17778

95% CI for difference: (-2,66026; 5,01582)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,63 P-Value = 0,535 DF = 29

Com que el P-value es relativament gran (superior a 0,25) s'accepta la hipòtesi que ambdós grups de dades pertanyin a una mateixa distribució, quedant l'histograma unificat així:



D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|---------|---------|--------|-----|-----|----------|----------|
| 38 | 0 | 15,3421 | 5,90133 | 14,5 | 7 | 38 | 1,73780 | 4,86773 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

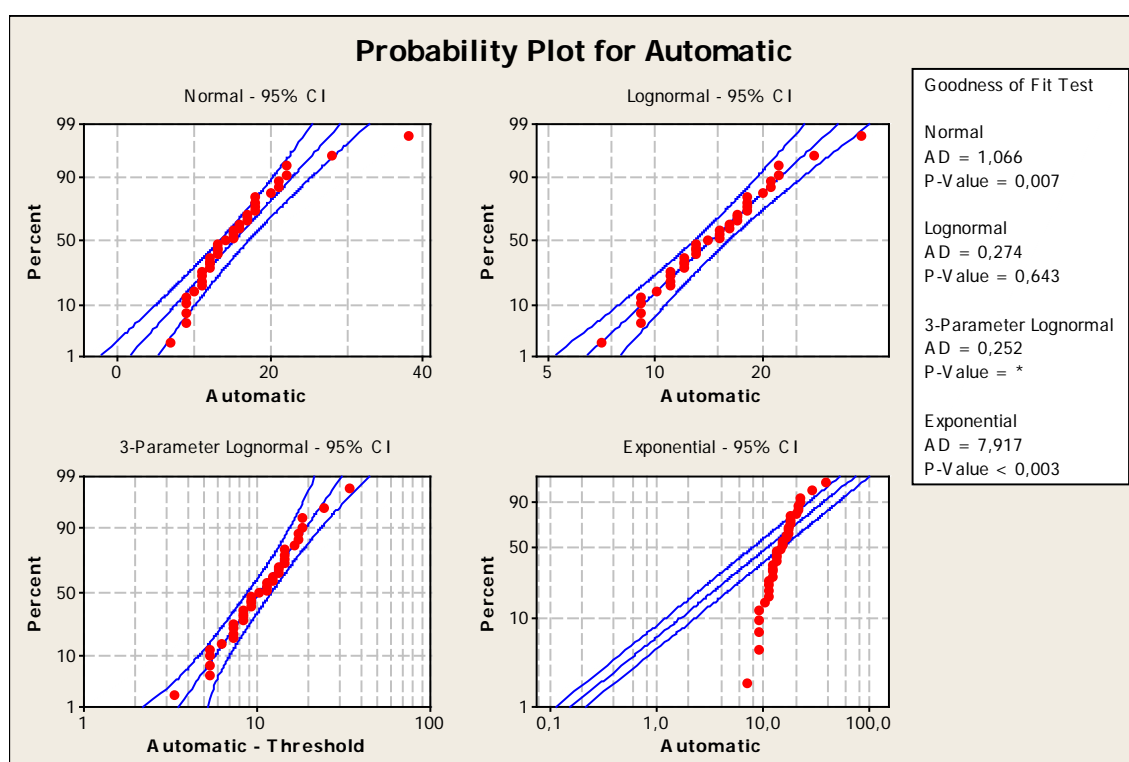
Qualitat de l'ajust:

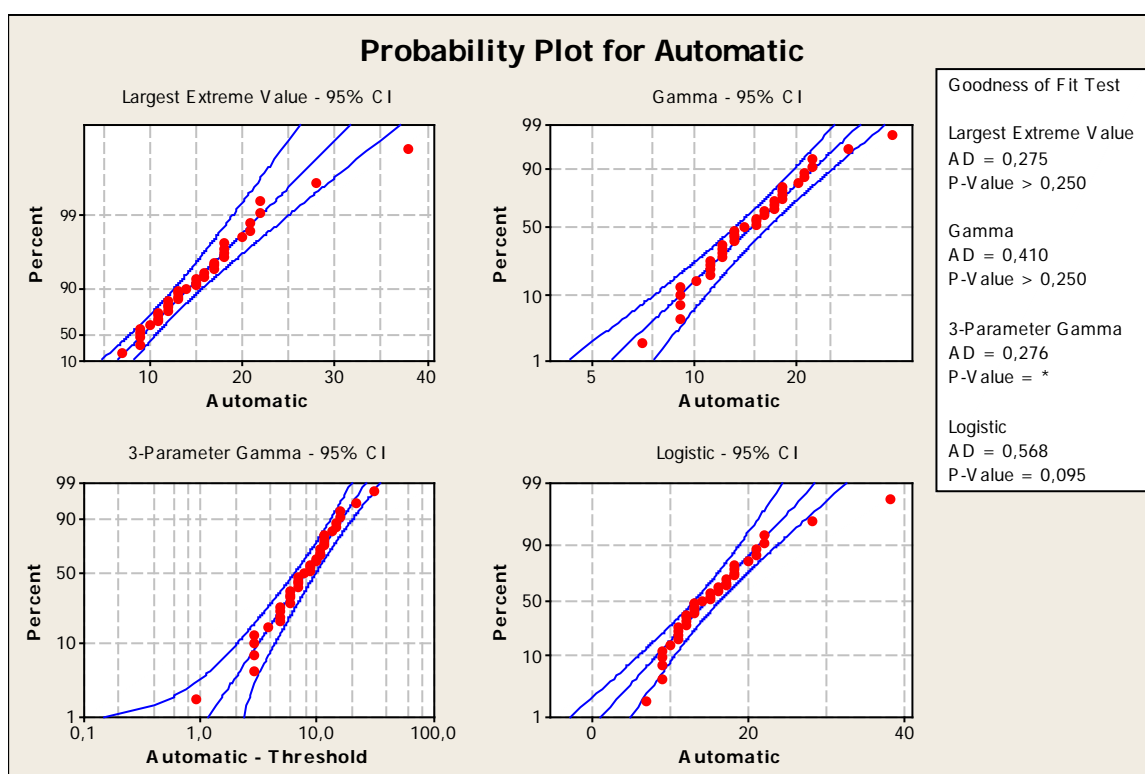
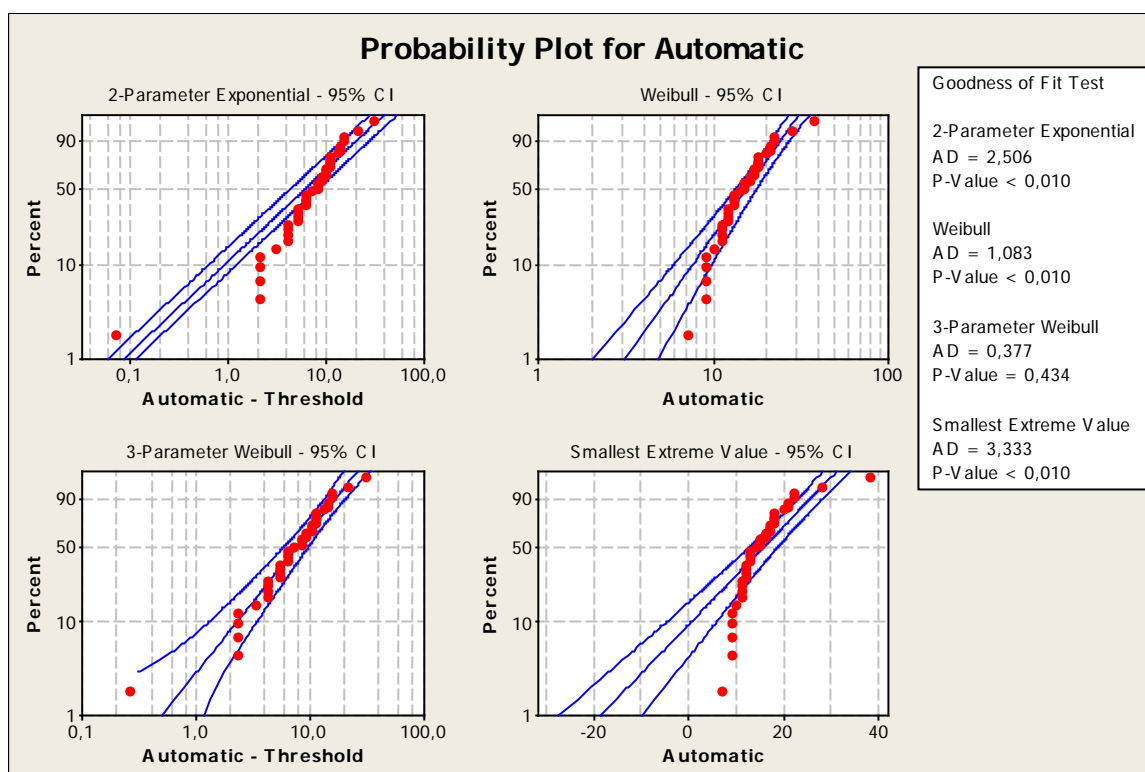
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Normal | 1,066 | 0,007 | |
| Lognormal | 0,274 | 0,643 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,252 | * | 0,339 |
| Exponential | 7,917 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 2,506 | <0,010 | 0,000 |
| Weibull | 1,083 | <0,010 | |
| 3-Parameter Weibull | 0,377 | 0,434 | 0,001 |
| Smallest Extreme Value | 3,333 | <0,010 | |
| Largest Extreme Value | 0,275 | >0,250 | |
| Gamma | 0,410 | >0,250 | |
| 3-Parameter Gamma | 0,276 | * | 0,079 |
| Logistic | 0,568 | 0,095 | |
| Loglogistic | 0,279 | >0,250 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,275 | * | 0,379 |

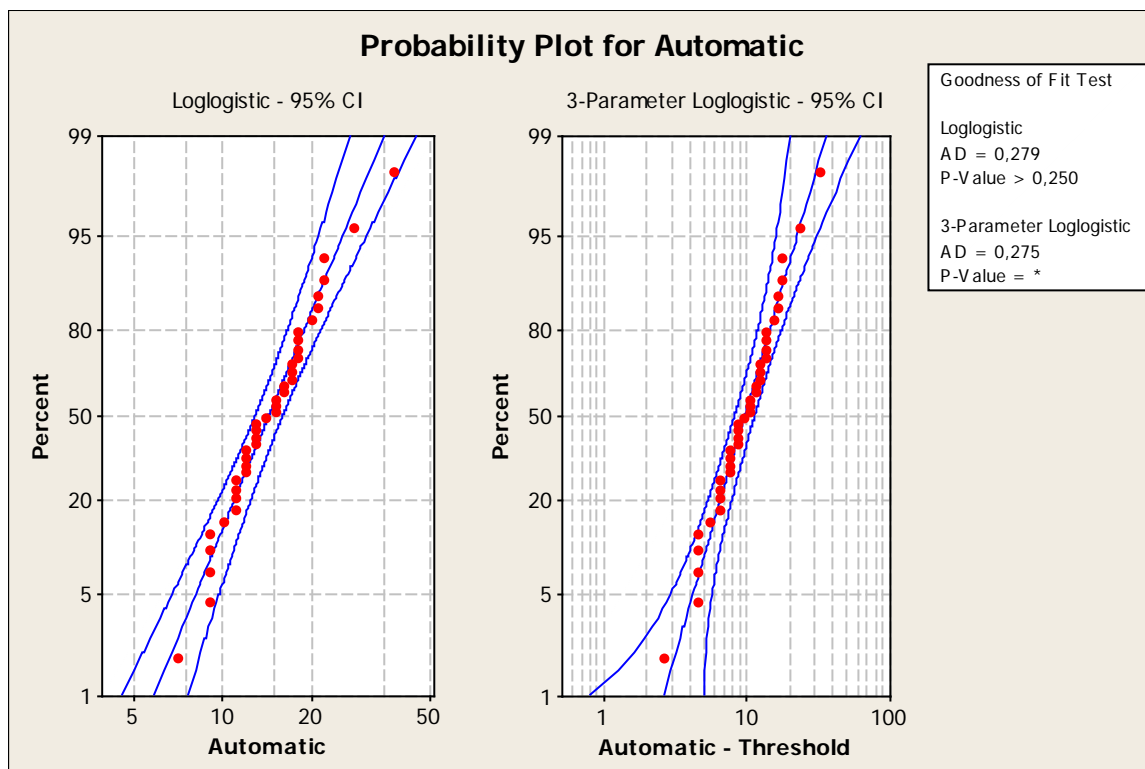
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|---------|----------|-----------|
| Normal* | 15,34211 | | 5,90133 | |
| Lognormal* | 2,66933 | | 0,34669 | |
| 3-Parameter Lognormal | 2,34490 | | 0,46755 | 3,69943 |
| Exponential | | | 15,34211 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 8,41211 | 6,93000 |
| Weibull | | 2,67048 | 17,22447 | |
| 3-Parameter Weibull | | 1,54474 | 9,56702 | 6,74065 |
| Smallest Extreme Value | 18,65045 | | 8,13876 | |
| Largest Extreme Value | 12,86748 | | 4,09956 | |
| Gamma | | 8,32371 | 1,84318 | |
| 3-Parameter Gamma | | 2,73035 | 3,38939 | 6,08790 |
| Logistic | 14,70388 | | 2,98227 | |
| Loglogistic | 2,66012 | | 0,19415 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 2,27665 | | 0,28647 | 4,37674 |

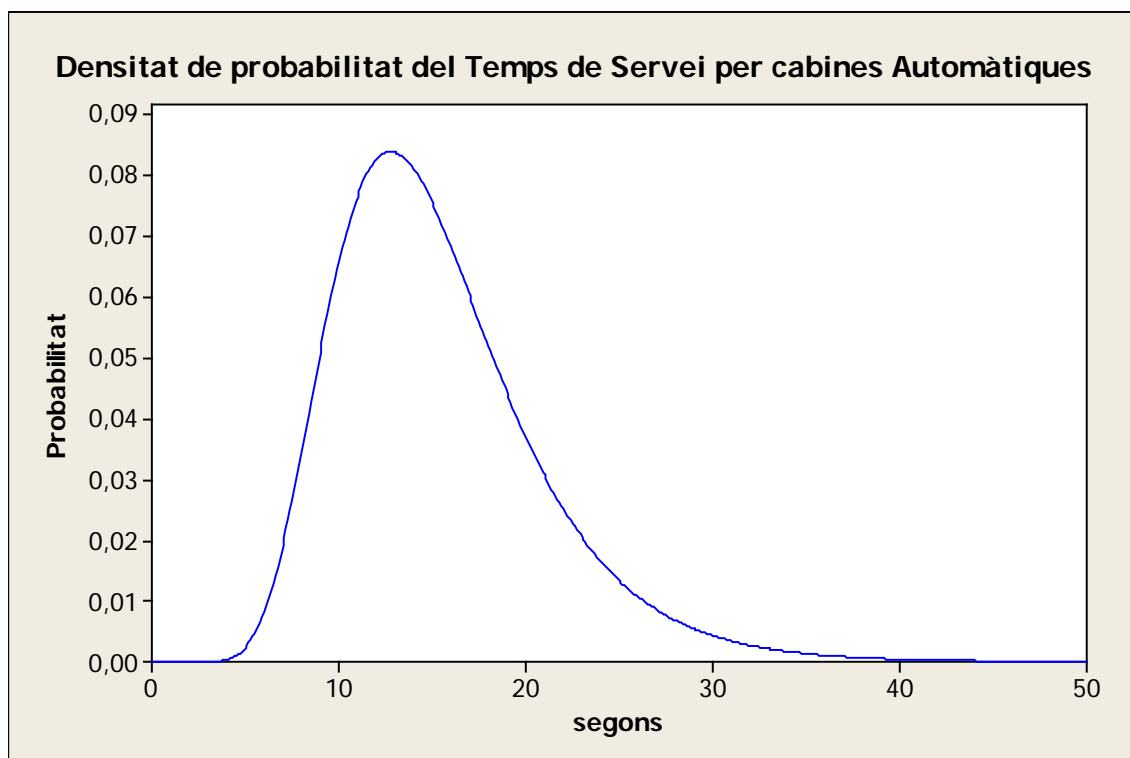
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:

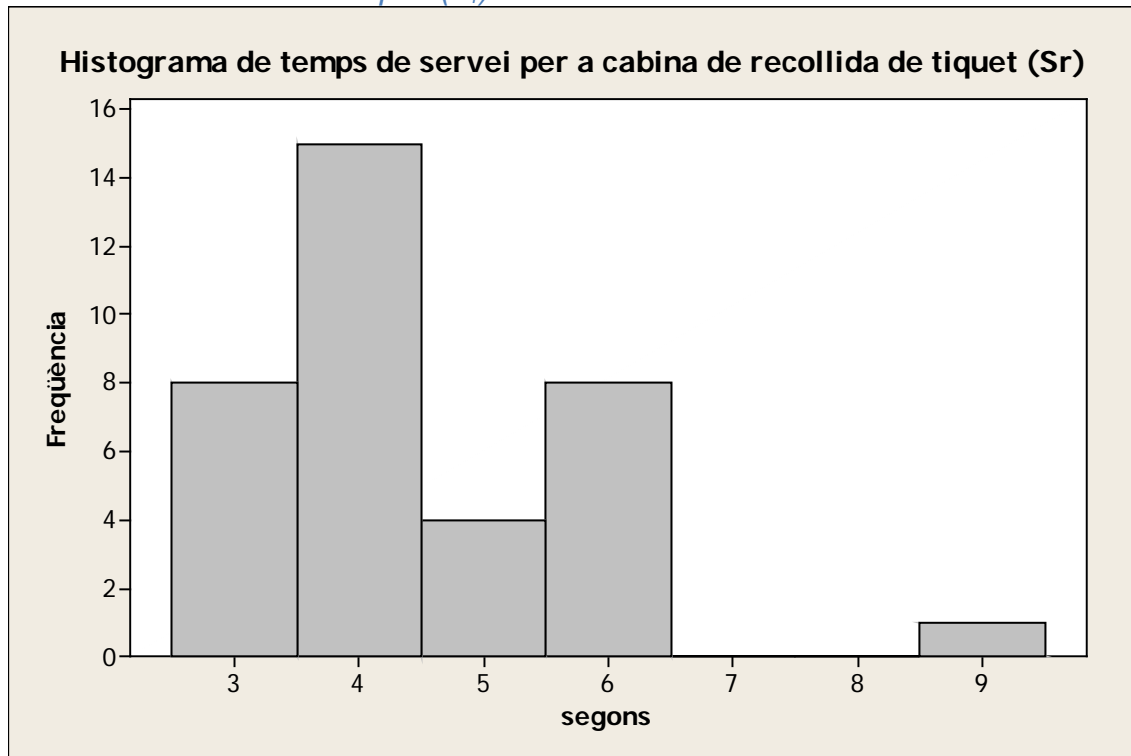






A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 2,66933 i 0,34669**, degut al valor relativament gran de P (taula anterior: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. La seva densitat de probabilitat és la següent:



Cabines de recollida de tiquet (S_r)

D'aquestes dades s'extreuen els paràmetres estadístics bàsics següents:

Descriptive Statistics:

| N | N* | Mean | StDev | Median | Min | Max | Skewness | Kurtosis |
|----|----|---------|---------|--------|-----|-----|----------|----------|
| 36 | 0 | 4,47222 | 1,31987 | 4 | 3 | 9 | 1,24771 | 2,34096 |

Realitzant un ajust de totes les distribucions probabilístiques que el programa permet s'obtenen els següents resultats:

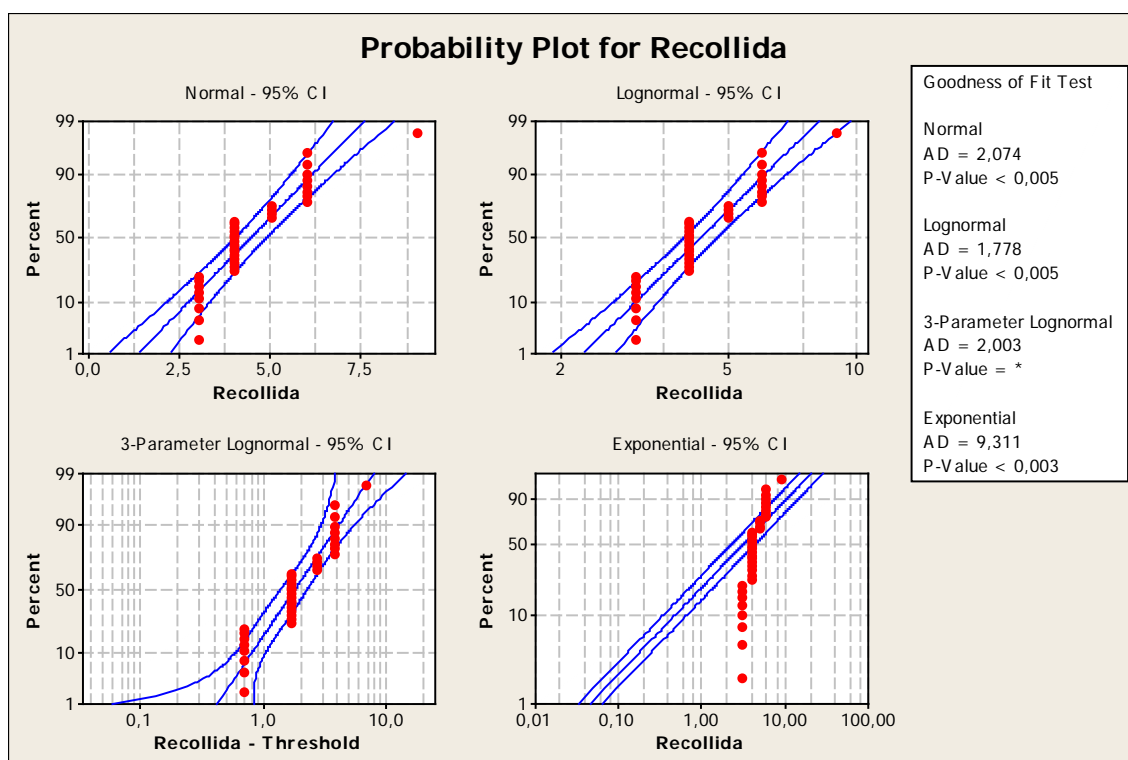
Qualitat de l'ajust:

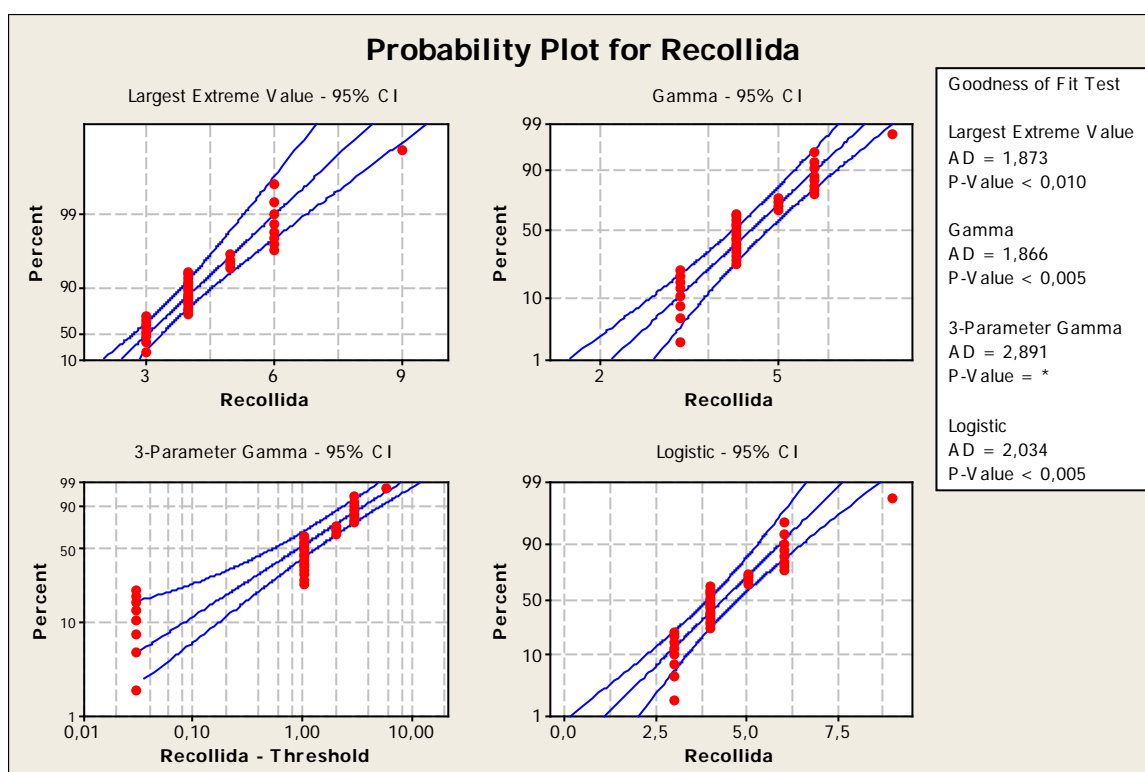
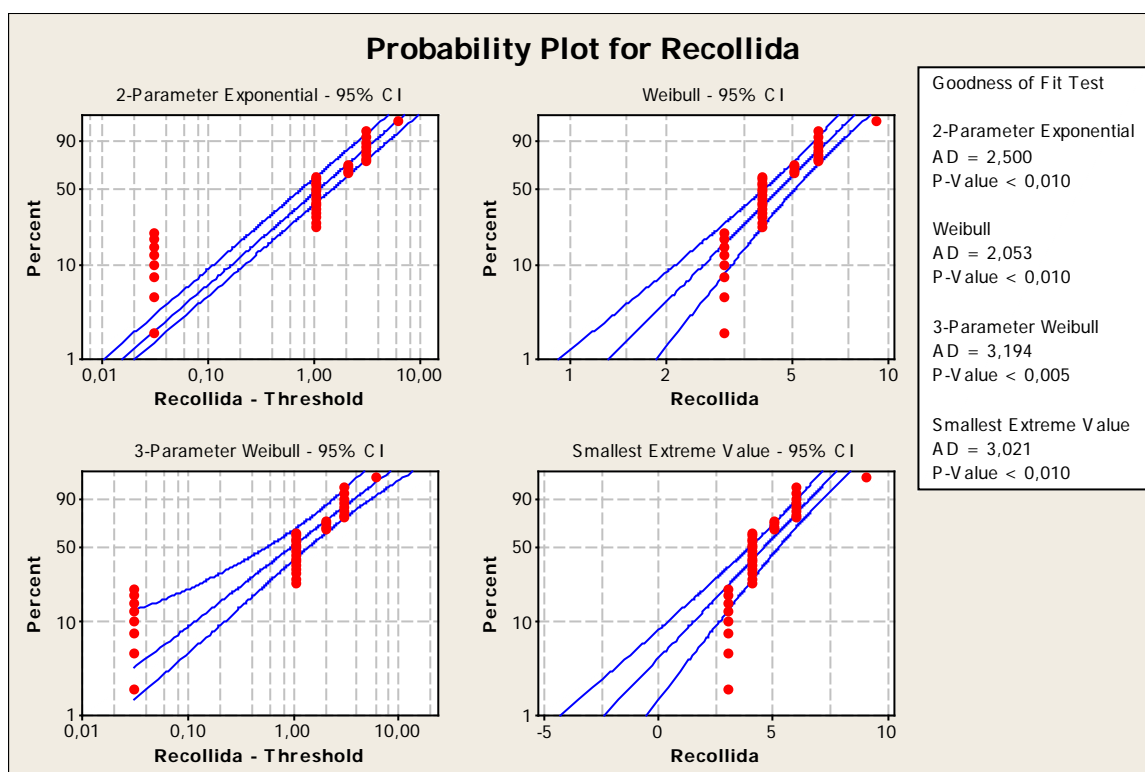
| Distribution | AD | P | LRT P |
|-------------------------|-------|--------|-------|
| Normal | 2,074 | <0,005 | |
| Lognormal | 1,778 | <0,005 | |
| 3-Parameter Lognormal | 2,003 | * | 0,090 |
| Exponential | 9,311 | <0,003 | |
| 2-Parameter Exponential | 2,500 | <0,010 | 0,000 |
| Weibull | 2,053 | <0,010 | |
| 3-Parameter Weibull | 3,194 | <0,005 | 0,000 |
| Smallest Extreme Value | 3,021 | <0,010 | |
| Largest Extreme Value | 1,873 | <0,010 | |
| Gamma | 1,866 | <0,005 | |
| 3-Parameter Gamma | 2,891 | * | 0,000 |
| Logistic | 2,034 | <0,005 | |
| Loglogistic | 1,817 | <0,005 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 1,983 | * | 0,126 |

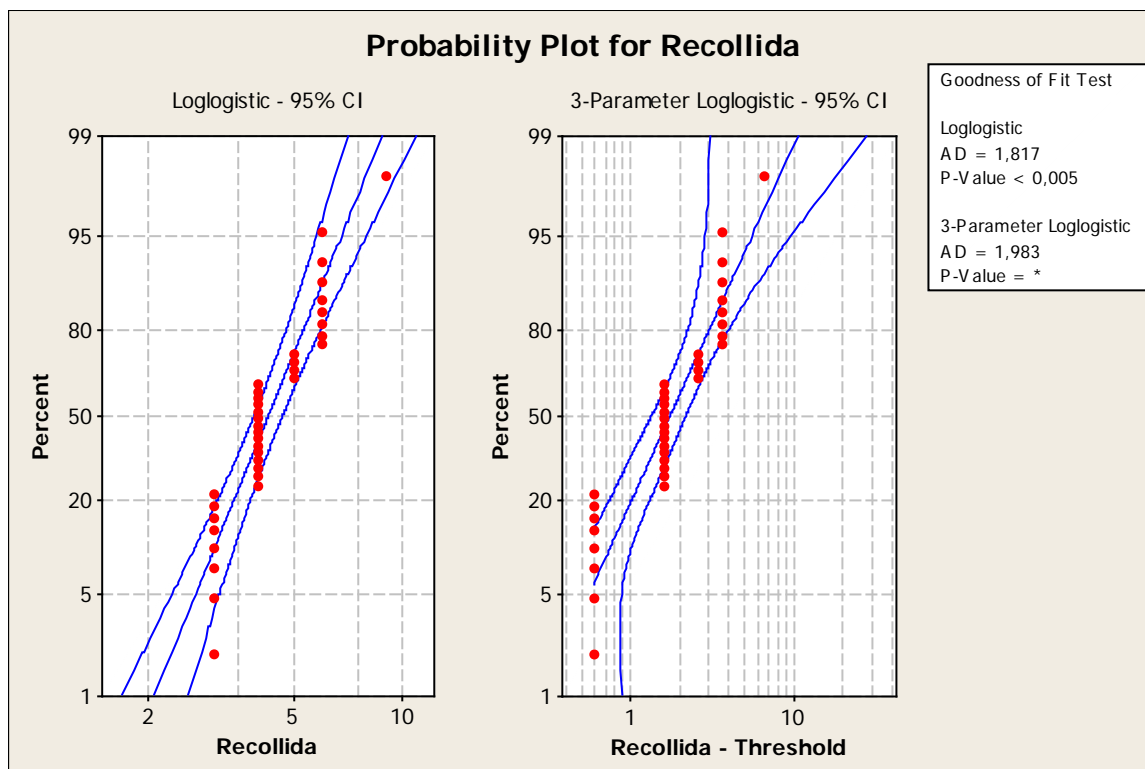
Estimació dels paràmetres per a cada ajust:

| Distribution | Location | Shape | Scale | Threshold |
|-------------------------|----------|----------|---------|-----------|
| Normal* | 4,47222 | | 1,31987 | |
| Lognormal* | 1,45979 | | 0,27462 | |
| 3-Parameter Lognormal | 0,57754 | | 0,62871 | 2,32694 |
| Exponential | | | 4,47222 | |
| 2-Parameter Exponential | | | 1,50222 | 2,97000 |
| Weibull | | 3,44111 | 4,95426 | |
| 3-Parameter Weibull | | 0,87984 | 1,42935 | 2,97000 |
| Smallest Extreme Value | 5,18690 | | 1,66447 | |
| Largest Extreme Value | 3,89480 | | 0,95486 | |
| Gamma | | 13,28873 | 0,33654 | |
| 3-Parameter Gamma | | 0,74937 | 2,00464 | 2,97000 |
| Logistic | 4,33525 | | 0,71497 | |
| Loglogistic | 1,44687 | | 0,15728 | |
| 3-Parameter Loglogistic | 0,54532 | | 0,39149 | 2,41661 |

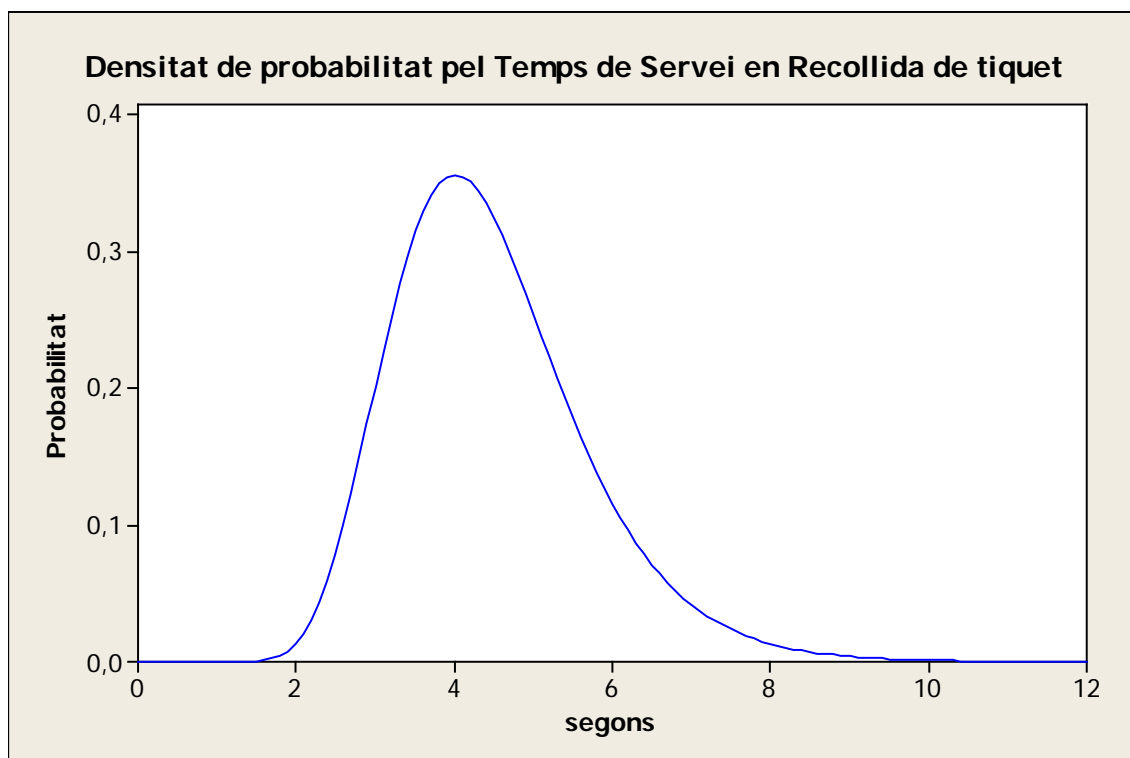
Juntament amb les gràfiques de probabilitat per a cada ajust on es pot observar la bondat de cada distribució en relació a les dades de camp:







A partir d'aquestes dades es decideix prendre com a millor ajust una aproximació **lognormal amb paràmetres 1,45979 i 0,27462**, degut al valor relativament gran de P (taula: Qualitat de l'ajust) i a la vista de la gràfica del seu ajust probabilístic. La seva funció de densitat de probabilitat té el següent aspecte:



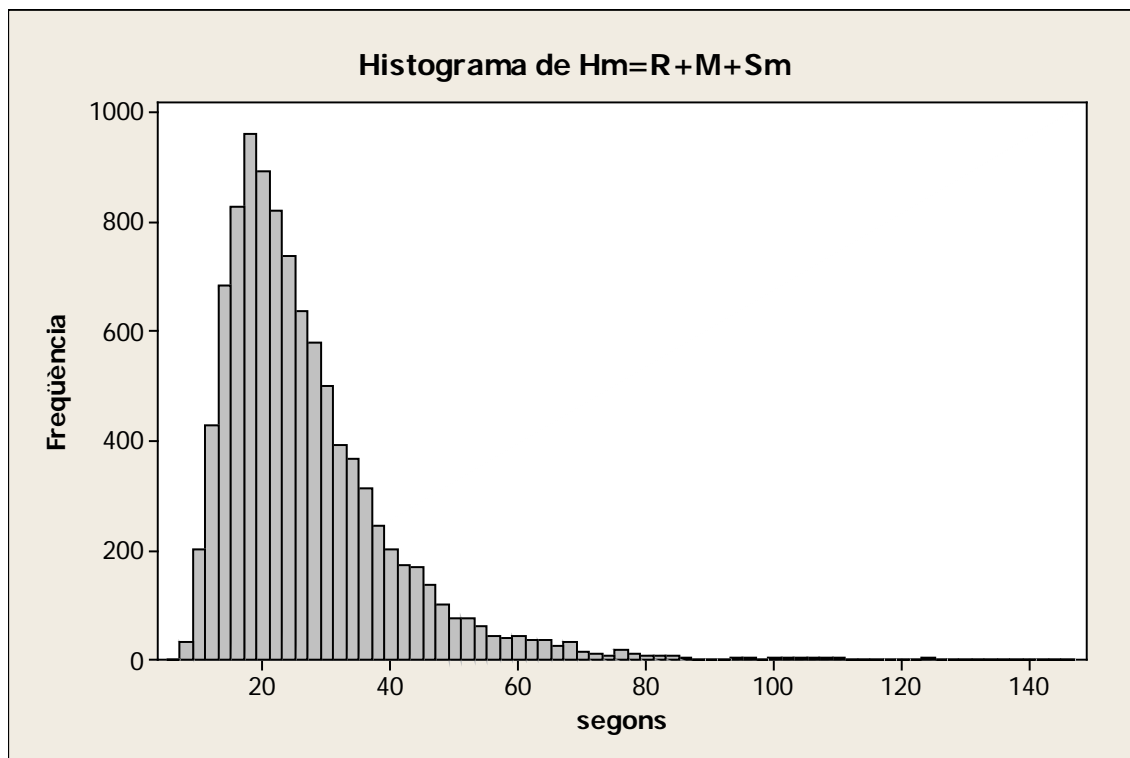
4. Headway (H)

El *headway* s'obté de sumar el temps de reacció, el temps de posicionament i el temps de servei. Com que es consideren tres tipus de temps de servei, es trobarà un *headway* per a cadascun.

Headway per cabines manuals (H_m)

Realitzant la suma de les distribucions corresponents, s'obté l'histograma del *headway* per cabines de pagament manual (H_m).

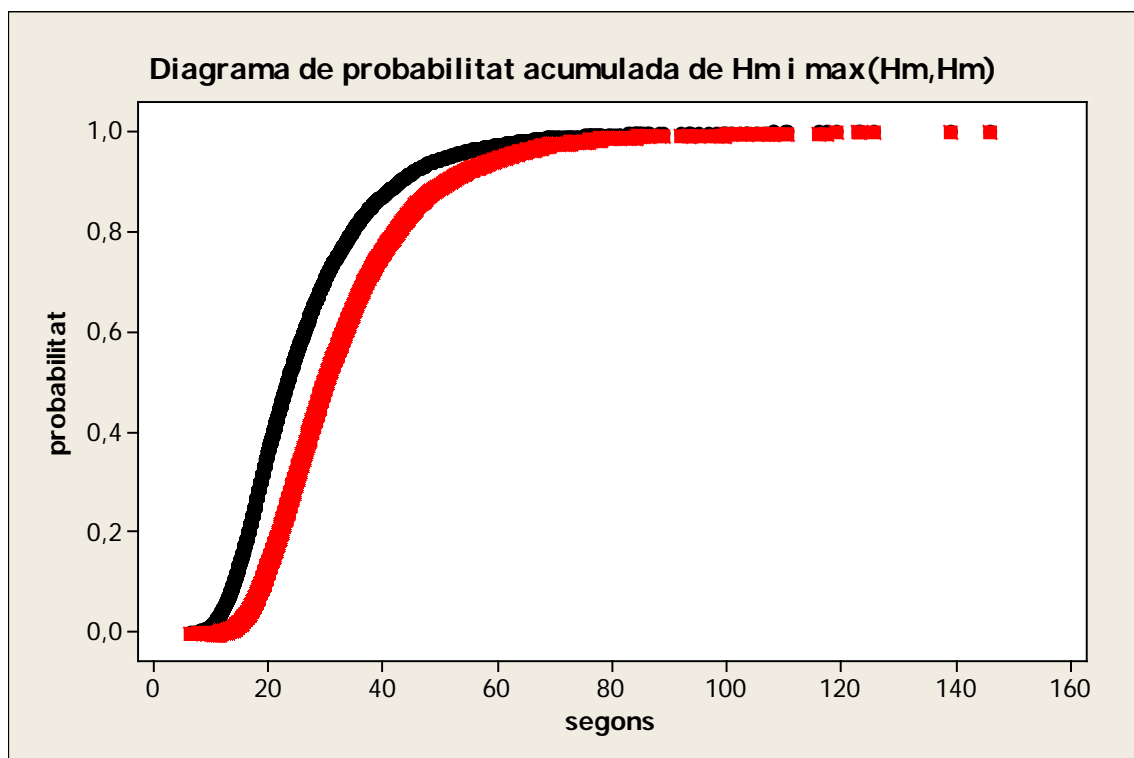
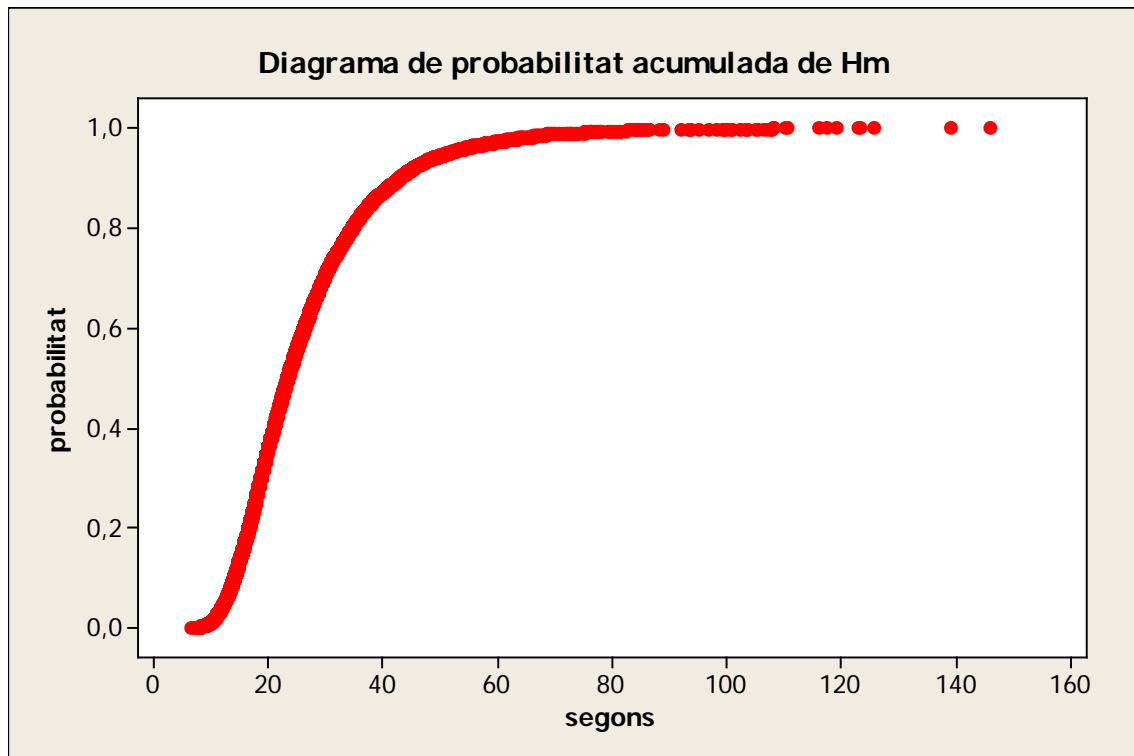
$$H_m = R + M + S_m$$



Amb les següents característiques estadístiques:

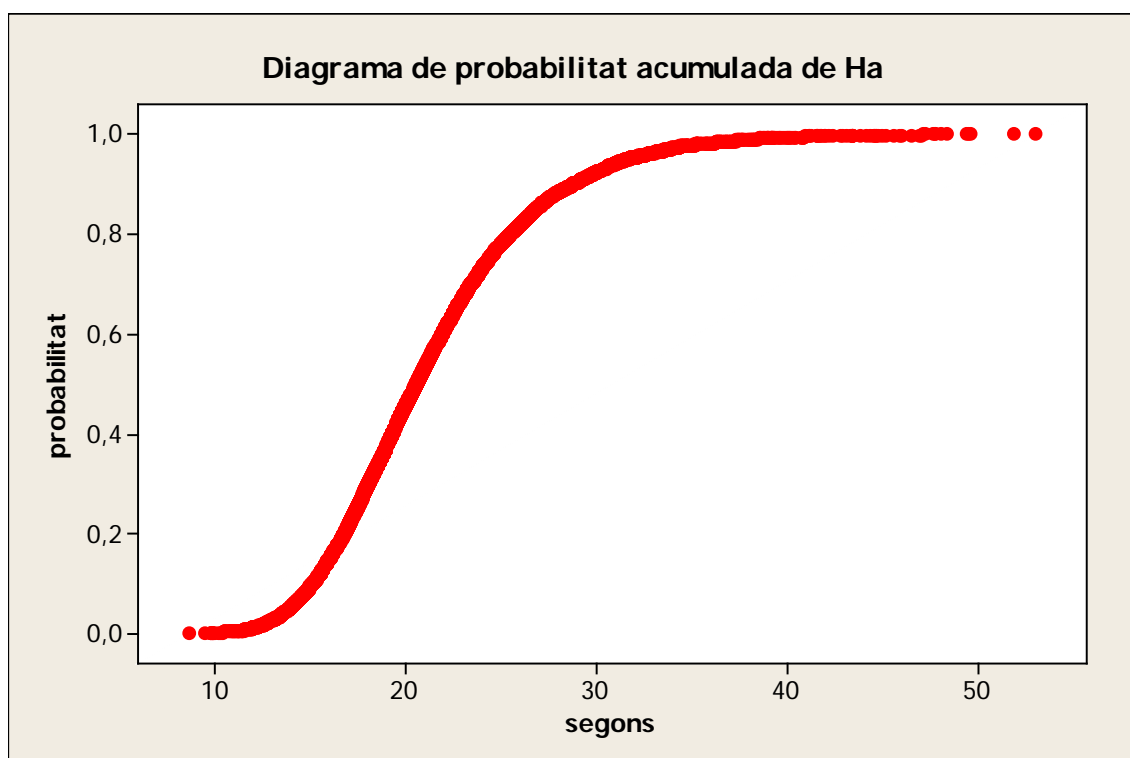
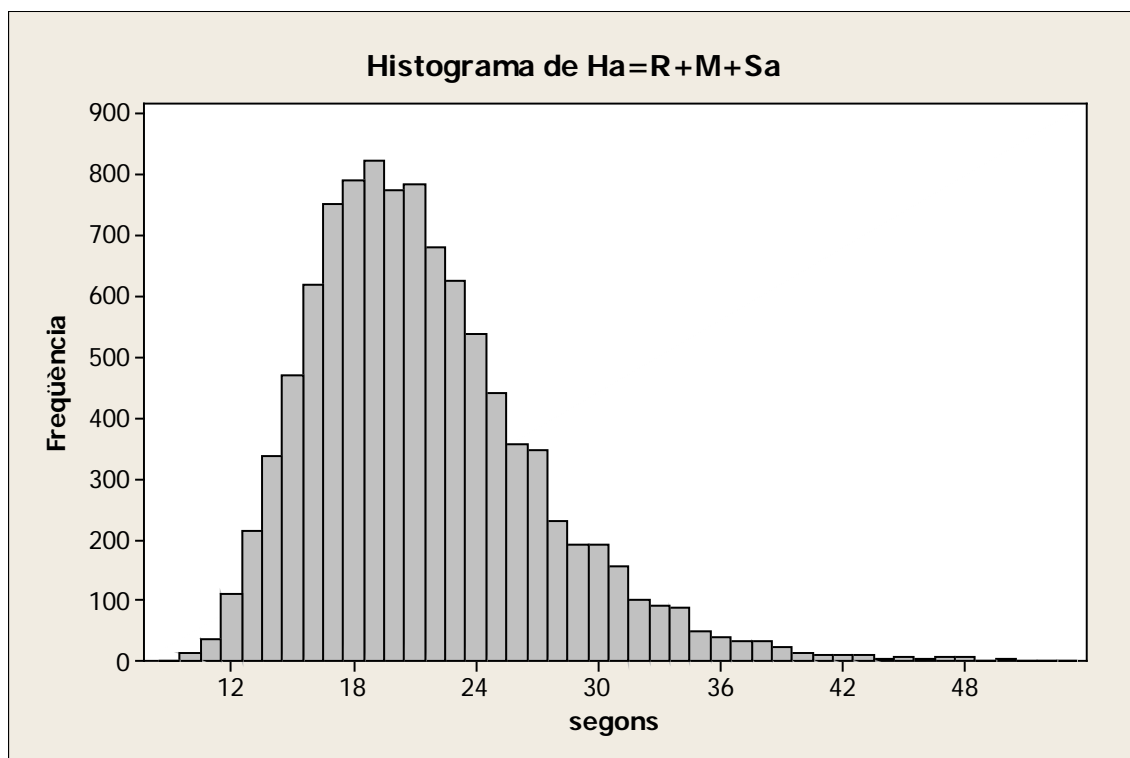
| Mean | StDev | Min | Q1 | Median | Q3 | Maximum |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 26,602 | 13,163 | 6,559 | 17,674 | 23,356 | 31,963 | 146,084 |

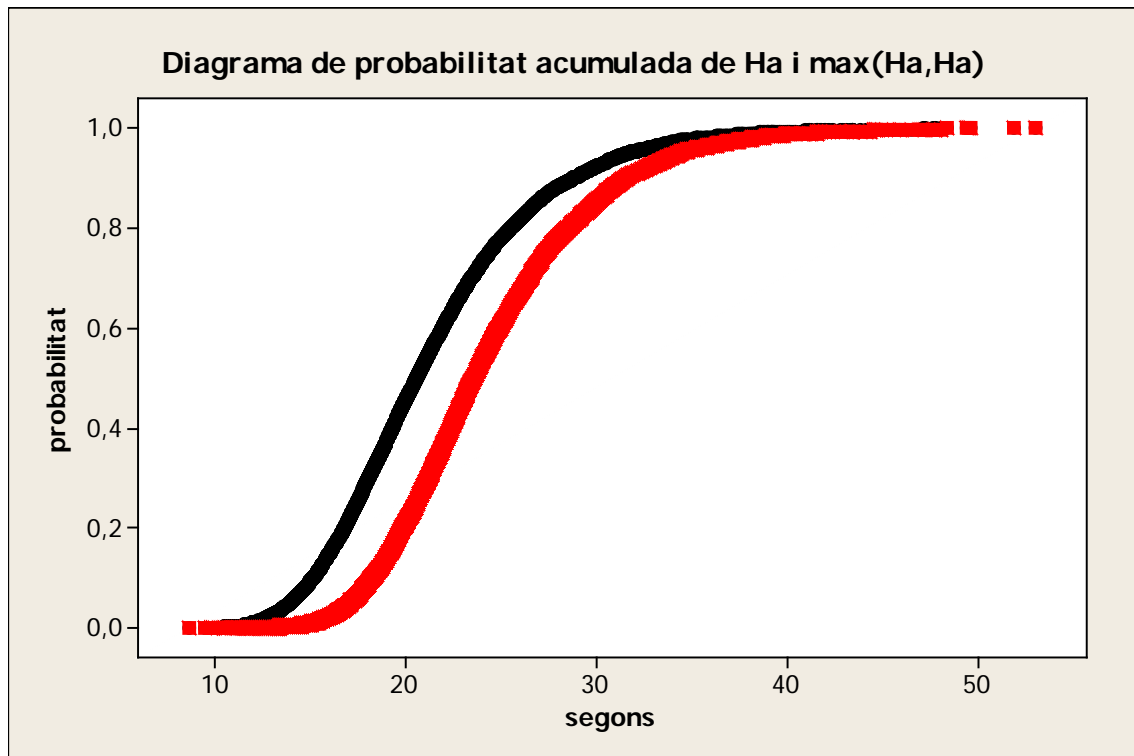
A continuació es mostra la corba de probabilitat acumulada per al *headway* que s'acaba d'obtenir. I seguit a aquesta figura es mostra la corba de probabilitat acumulada per al màxim de dos *headways*, el qual, correspon al producte de les corbes de probabilitat.



Headway per cabines automàtiques (H_a)

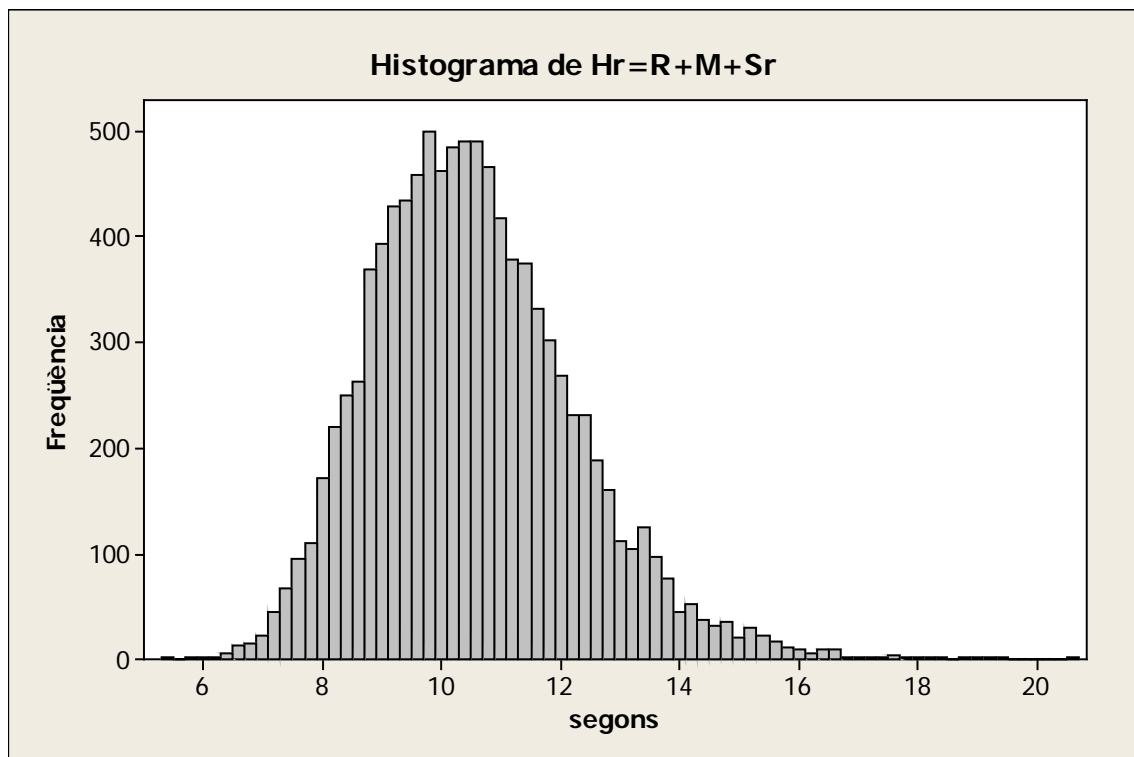
Es fa el mateix procés que s'ha fet anteriorment amb les cabines manuals, però ara per les cabines automàtiques:

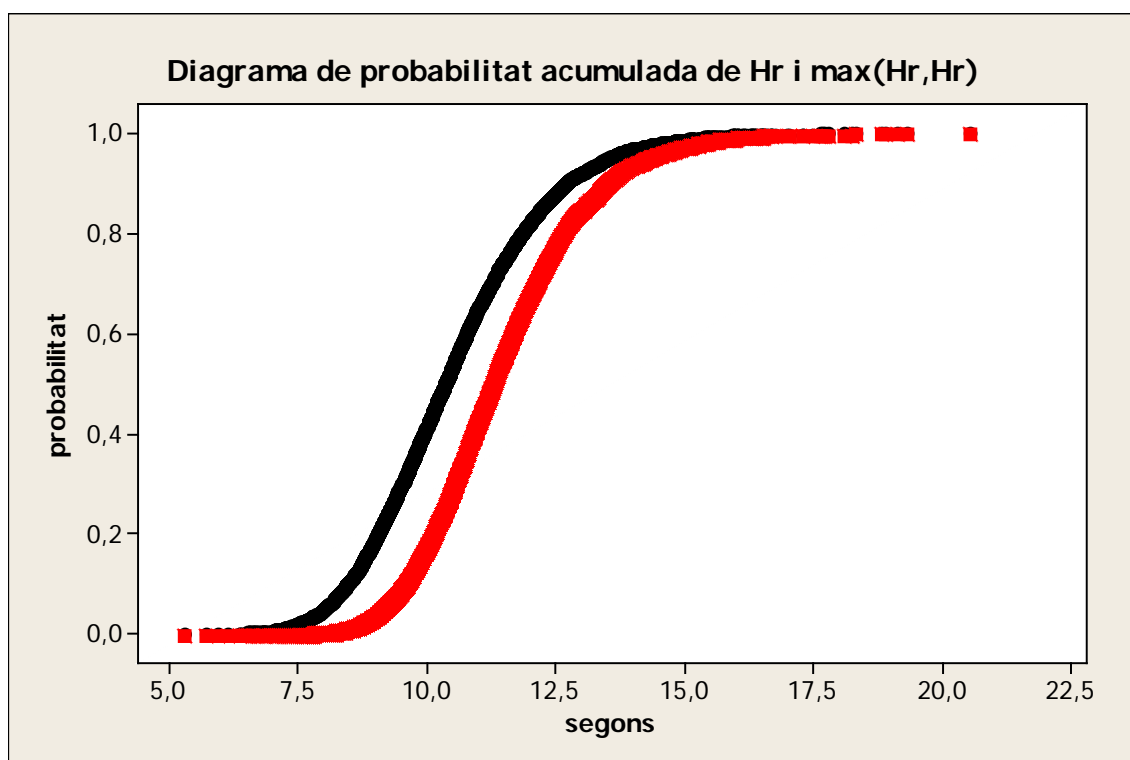
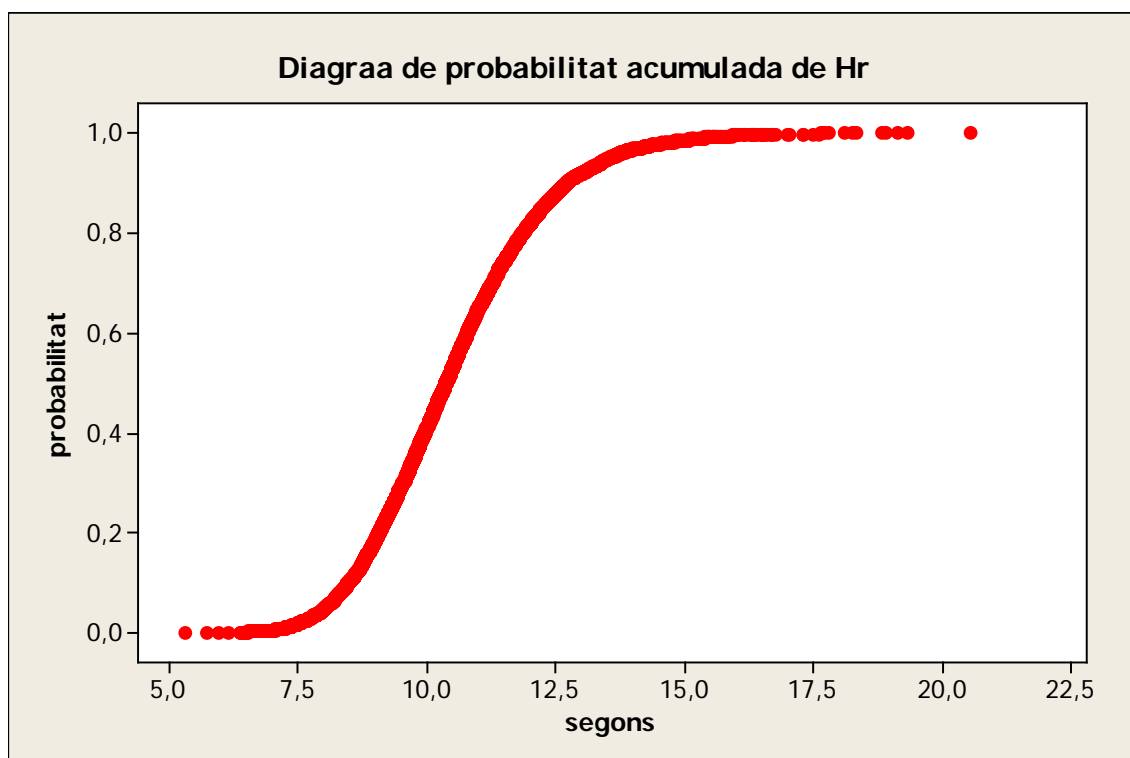




Headway per cabines de recollida de tiquet (H_r)

Es fa el mateix procediment que s'ha seguit en els dos subapartats anteriors pel cas de les cabines de recollida de tiquet:





Annex B: Anàlisi econòmic

En aquest annex es mostra amb detall el procediment seguit per tal d'arribar als resultats que s'especifiquen a l'apartat 5.2. La informació ha estat aportada per abertis (Cetres Enginyers, 2002) i els preus són en base a 2002, es podrien afectar per un coeficient per tal d'actualitzar-los, però com que el que es pretén fer en aquest estudi és una comparativa entre les diferents alternatives, no importen els valors absoluts, sinó els relatius.

Costos

Es procedeix a extreure les expressions dels costos de construcció de N carrils de peatge en tres alternatives: crear nous carrils habituals, crear nous carrils tàndem i adaptar carrils habituals a tàndem.

Alternativa A: crear nous carrils amb el format habitual (una cabina per carril).

En aquest quadre es mostren desglossats els costos de la construcció d'un peatge habitual amb una cabina per carril en costos fixos i costos variables.

| Costos de la creació de carrils habituals (d'una cabina per carril) | | | |
|---|----------|---------------------------------------|----------|
| Cost fix | | Cost variable (per nombre de carrils) | |
| Drenatge | 42.000 € | Treballs previs i explanació | 10.000 € |
| Senyalització i prot. obra | 40.000 € | Ferms granulars | 26.000 € |
| Obra civil il·luminació | 54.000 € | Ferms bituminosos i pav. especials | 59.000 € |
| | | Illetes i lloses de peatge | 10.000 € |
| | | Instal·lacions a la marquesina | 3.600 € |
| | | Estructura i coberta marquesina | 15.300 € |
| | | Cabines de peatge | 11.800 € |
| | | Il·luminació de la plataforma | 2.000 € |
| | | Instal·lacions elèctriques | 3.000 € |
| 136.000 € | | 140.700 € | |

Preus en base a any 2002.

Per tant, l'expressió per obtenir el cost total de la creació de N carrils nous amb el format habitual d'una cabina per carril és:

$$Cost = 136.000 + 140.700 \cdot N$$

Alternativa B: crear nous carrils amb el format tàndem (dues cabines per carril).

D'altra banda, si el que es vol és construir nous carrils, però amb el format tàndem, és a dir, dues cabines per carril, s'han de fer unes modificacions en aquests costos basades en hipòtesis, ja que no s'ha construït mai aquesta tipologia de peatge. Així doncs es pot obtenir la següent taula:

| Costos de la construcció de carrils tàndem (de dues cabines per carril) | | | | | | | |
|---|-------------|-----|-------------|--|-------------|------|-------------|
| Cost fix | | | | Cost variable | | | |
| Partida | Cost normal | (*) | Cost tàndem | Partida | Cost normal | (*) | Cost tàndem |
| Drenatge | 42.000 € | 1 | 42.000 € | Treballs previs i explanació | 10.000 € | 1 | 10.000 € |
| Senyalització | | | | | | | |
| I prot. obra | 40.000 € | 1 | 40.000 € | Ferms granulars | 26.000 € | 1 | 26.000 € |
| Obra civil | | | | Ferms bitumino | | | |
| il·luminació | 54.000 € | 1 | 54.000 € | i pav. Especials ⁽¹⁾ | 59.000 € | 1,25 | 73.750 € |
| | | | | Il·letes i lloses de peatge | 10.000 € | 2 | 20.000 € |
| | | | | Instal·lacions a la marquesina | 3.600 € | 2 | 7.200 € |
| | | | | Estructura i coberta Marquesina ⁽²⁾ | 15.300 € | 1,75 | 26.775 € |
| | | | | Cabines de peatge | 11.800 € | 2 | 23.600 € |
| | | | | Il·luminació de la plataforma | 2.000 € | 2 | 4.000 € |
| | | | | Instal·lacions elèctriques | 3.000 € | 2 | 6.000 € |
| 136.000 € | | | | 197.325 € | | | |

(*) factor pel qual es multiplica el cost de construcció del peatge d'una cabina per carril per obtenir el cost de construcció del peatge tàndem (basat en hipòtesis).

(1) Es considera un factor de 1,25 per suposar un àrea de transició (des de i fins l'enllaç amb el tronc de l'autopista) més suau, degut a la major longitud dels toll booth.

(2) Es considera un factor de 1,75 ja que la marquesina haurà de ser més gran degut a la longitud major del toll booth, però es suposa que no arribarà a ser el doble de cara, ja que no tindrà tampoc el doble de superfície.

L'expressió, en aquest cas, per a l'obtenció del cost total de realitzar N carrils és:

$$Cost = 136.000 + 197.325 \cdot N$$

Alternativa C: adaptar carrils habituals a carrils tàndem.

| Costos de l'adaptació de carrils existents a carrils tàndem (amb dues cabines per carril) | | | | | | | |
|---|-------------|------|-----------------|--|-------------|------|-----------------|
| Cost fix | | | | Cost variable | | | |
| Partida | Cost normal | (*) | Cost tàndem | Partida | Cost normal | (*) | Cost tàndem |
| Drenatge | 42.000 € | 0 | 0 € | Treballs previs i explanació ⁽²⁾ | 10.000 € | 1,5 | 15.000 € |
| Senyalització i prot. Obra ⁽¹⁾ | 40.000 € | 1,25 | 50.000 € | Ferms granulars | 26.000 € | 0 | 0 € |
| Obra civil | | | | Ferms bituminosos | | | |
| il·luminació | 54.000 € | 0 | 0 € | i pav. especials | 59.000 € | 0 | 0 € |
| | | | | Illetes i lloses de peatge | 10.000 € | 0 | 0 € |
| | | | | Instal·lacions a la marquesina | 3.600 € | 1 | 3.600 € |
| | | | | Estructura i coberta Marquesina ⁽³⁾ | 15.300 € | 2,19 | 33.469 € |
| | | | | Cabines de peatge | 11.800 € | 1 | 11.800 € |
| | | | | Il·luminació de la plataforma | 2.000 € | 1 | 2.000 € |
| | | | | Instal·lacions elèctriques | 3.000 € | 1 | 3.000 € |
| | | | 50.000 € | | | | 68.869 € |

(*) factor pel qual es multiplica el cost de construcció del peatge d'una cabina per carril per obtenir el cost de l'adaptació d'un carril d'una cabina a un carril de tàndem (basat en hipòtesis).

(1) Es considera un factor de 1,25 pel fet que els treballs es realitzen sobre un carril existent inutilitzant-lo i entorpint el trànsit.

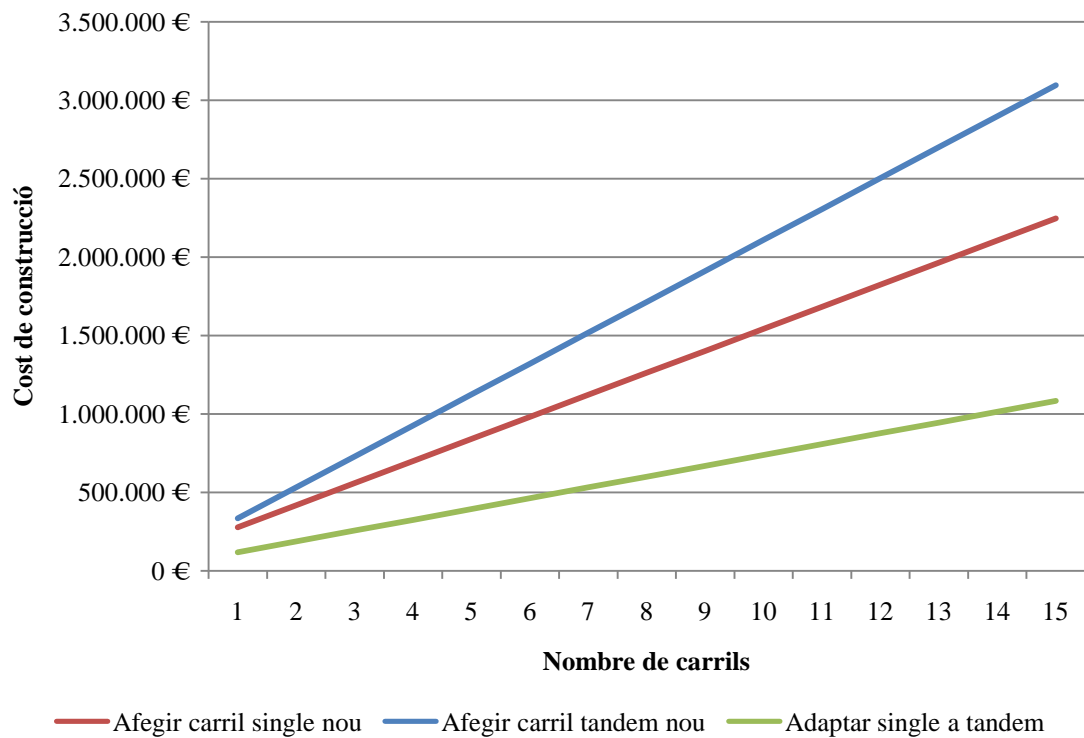
(2) Es considera un factor de 1,5 per haver de preparar el carril per a fer el tàndem.

(3) Es considera un factor resultant de multiplicar un 1,75 ja que la nova marquesina serà més gran i un 1,25 per les tasques relacionades amb treure la marquesina antiga.

I l'expressió general d'adaptar N carrils és:

$$\text{Cost} = 50.000 + 68869 \cdot N$$

A la figura següent, es representen les expressions dels costos per cada cas de forma gràfica en funció del nombre de carrils que intervinguin.



S'ha considerat el mateix cost de construcció per totes les cabines sense distingir entre el tipus de pagament per falta d'informació suficient. Però es suposa que la diferència entre el cost de cadascun dels tipus de cabina és relativament negligible en relació amb la resta de costos.

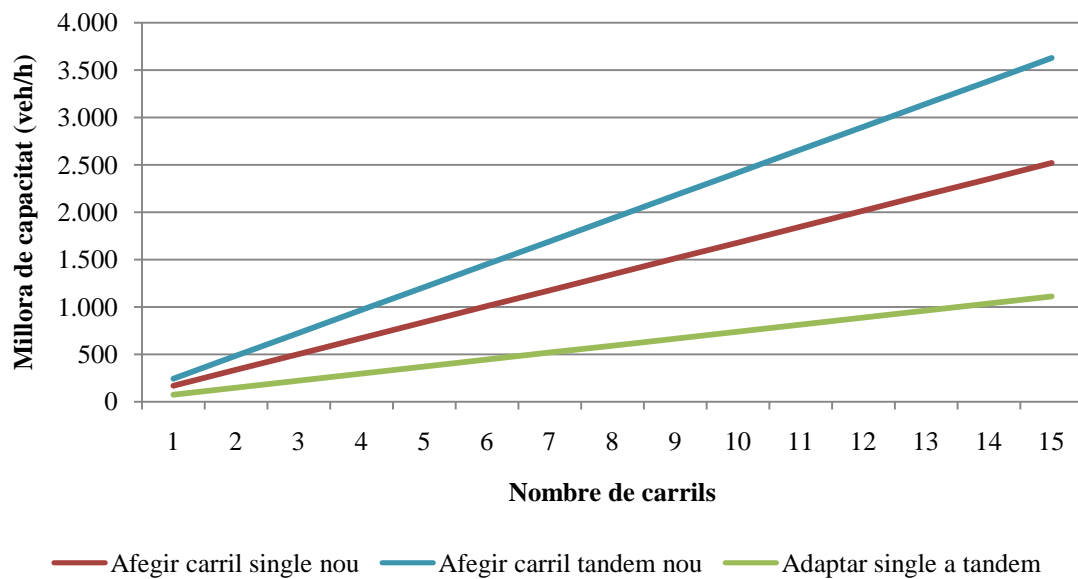
Millora de capacitat

Per altre banda, a partir dels resultats relatius a la capacitat obtinguts a l'apartat 5.1 es pot realitzar un gràfic en termes de millora de capacitat. Això es fa per cada tipus de cabina de pagament.

Cabina de pagament automàtic:

Es té en compte la millora de capacitat de l'etapa de maduresa i l'escenari intermig de la Taula 8 de l'apartat 5.1, és a dir, un 44%. També es considera una capacitat per carril de

$C = \frac{1}{H} = \frac{1}{21,4} = 168 \frac{veh}{h}$. Així s'obté el següent gràfic:



I les expressions corresponents:

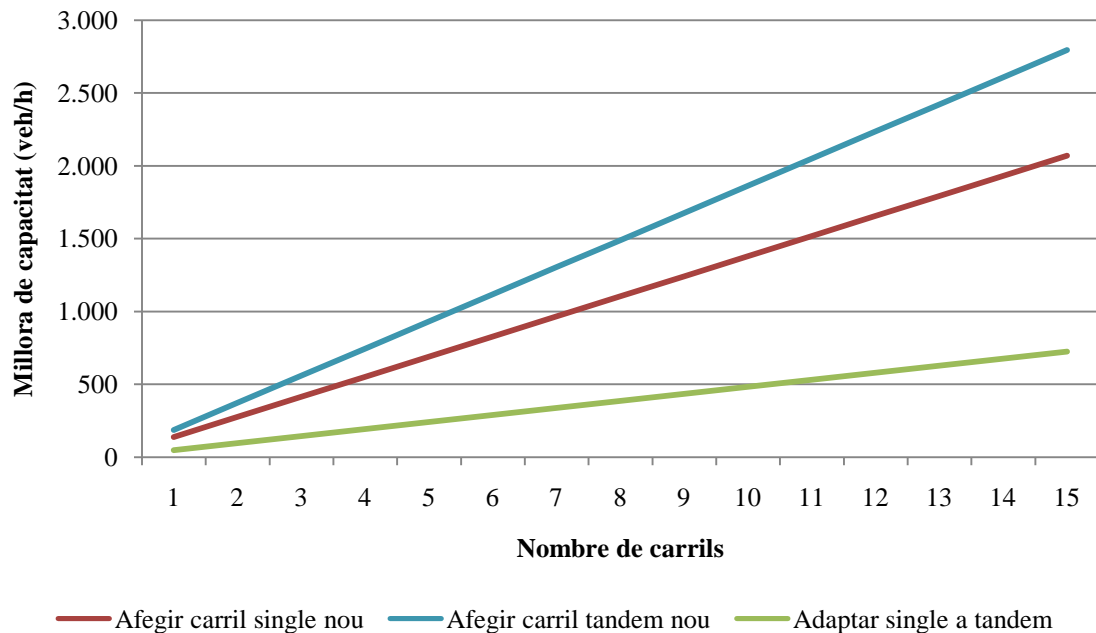
$$\Delta C = 168 \cdot N$$

$$\Delta C = 1,44 \cdot 168 \cdot N$$

$$\Delta C = 0,44 \cdot 168 \cdot N$$

Cabina de pagament manual:

Es té en compte la millora de capacitat de l'etapa de maduresa i l'escenari intermig de la Taula 6 de l'apartat 5.1, és a dir, un 35%. També es considera una capacitat per carril de $C = \frac{1}{H} = \frac{1}{26,1} = 138 \frac{veh}{h}$. Així s'obté el següent gràfic:



I les expressions corresponents:

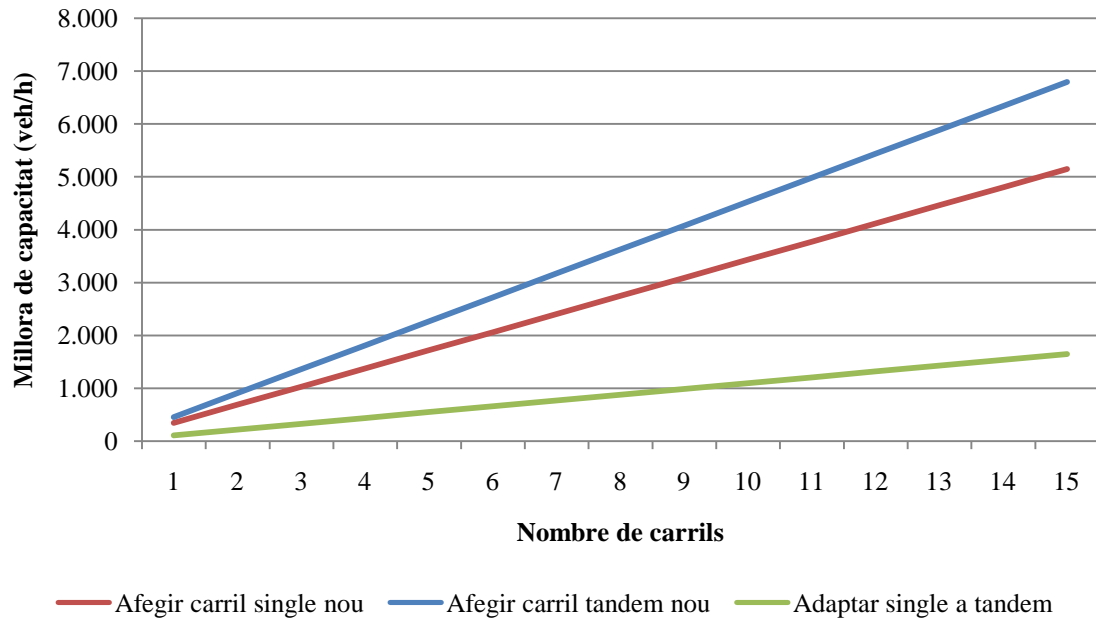
$$\Delta C = 138 \cdot N$$

$$\Delta C = 1,35 \cdot 138 \cdot N$$

$$\Delta C = 0,35 \cdot 138 \cdot N$$

Cabina de recollida de tiquet:

Es té en compte la millora de capacitat de l'etapa de maduresa i l'escenari intermig de la Taula 10 de l'apartat 5.1, és a dir, un 32%. També es considera una capacitat per carril de $C = \frac{1}{H} = \frac{1}{10,5} = 343 \frac{veh}{h}$. Així s'obté el següent gràfic:



I les expressions corresponents:

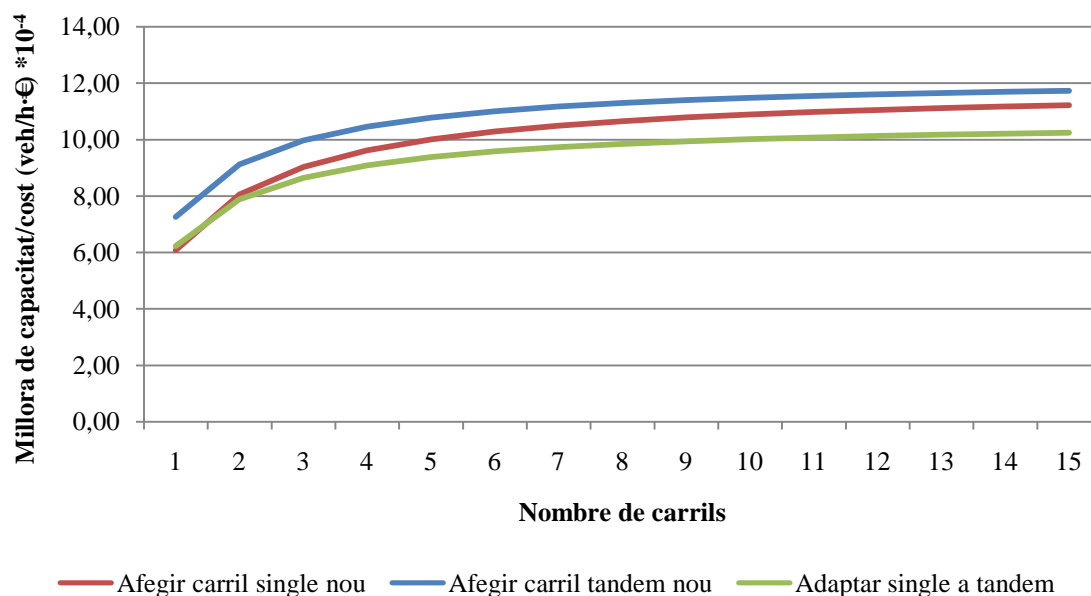
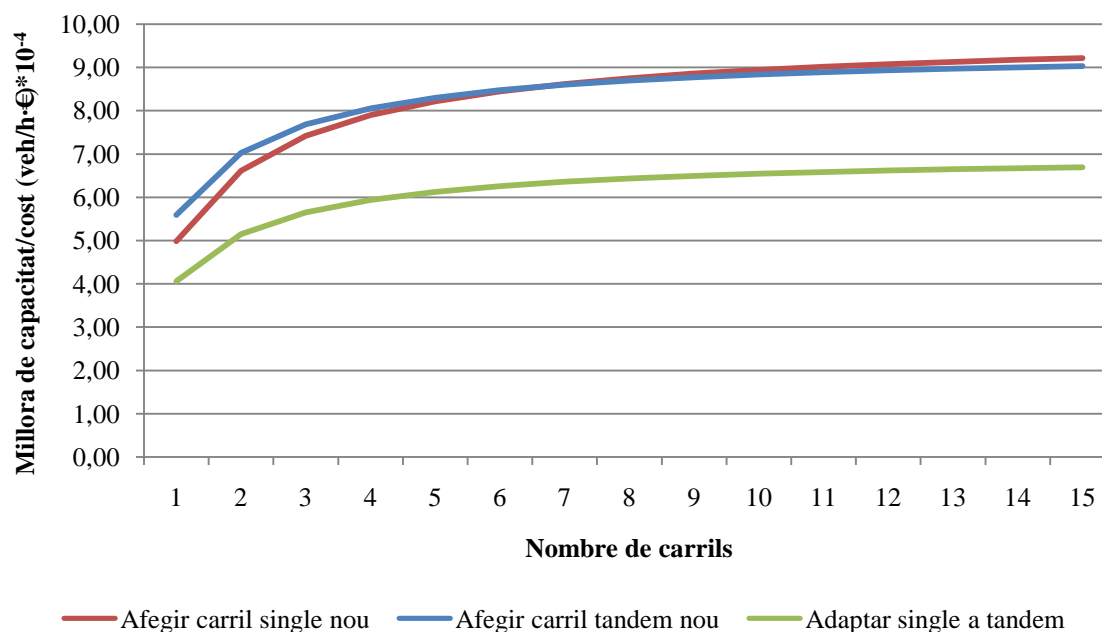
$$\Delta C = 343 \cdot N$$

$$\Delta C = 1,32 \cdot 343 \cdot N$$

$$\Delta C = 0,32 \cdot 343 \cdot N$$

Rati: Millora de capacitat / cost

Els dos apartats anteriors aporten informació important que s'hauria de poder apreciar de forma conjunta, així es crea la relació millora de capacitat per cost, la qual s'obté de dividir les millores de capacitat que s'obtenen en cada cas entre els costos que suposen. Aquest rati es mostra a continuació i ha estat multiplicat per un factor de 10.000 per tal d'obtenir nombres més simples. Això es fa per cada tipus de cabina de pagament.

Cabina de pagament automàtic:**Cabina de pagament manual:**

Cabina de recollida de tiquet: